

UNIVERSIDAD DE GRANADA

E.T.S. INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN Y PROYECTOS DE
INGENIERÍA**

PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA CIVIL (B23.56.1)



**UNIVERSIDAD
DE GRANADA**

**ESTUDIO DE VIABILIDAD DEL USO DE POLÍMEROS RECICLADOS
PARA LA MEJORA ESTRUCTURAL DE INFRAESTRUCTURAS DE
TRANSPORTE**

**FEASIBILITY STUDY ON THE USE OF RECYCLED POLYMERS FOR
THE STRUCTURAL IMPROVEMENT OF TRANSPORT
INFRASTRUCTURES**

TESIS DOCTORAL

D. Raúl Tauste Martínez

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Directores de Tesis:

D. Fernando M. Moreno Navarro

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales
y Puertos

D. Miguel del Sol Sánchez

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales
y Puertos

Granada, enero 2020

Editor: Universidad de Granada. Tesis Doctorales
Autor: Tauste Martínez, Raúl
ISBN: 978-84-1306-640-0
URI: <http://hdl.handle.net/10481/63930>

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quisiera agradecer aprovechando la ocasión que me brinda esta tesis a mis directores, Fernando Moreno Navarro y Miguel del Sol Sánchez, los cuales no solo han contribuido a que esta haya sido posible, sino que son principales responsables de despertar en mí la pasión por la investigación, de enseñarme que nunca hay que conformarse y siempre se debe estar dispuesto a dar un paso más allá, y de que haya logrado alcanzar metas que nunca habría imaginado ser capaz de alcanzar. De igual modo, debo agradecer a Mayca Rubio Gámez el haberme permitido formar parte de la familia que supone el grupo de investigación LabIC.UGR y seguir creciendo dentro del mismo. A todos ellos les estaré agradecido toda mi vida por hacer de mí un mejor profesional y una mejor persona.

De igual modo, no puedo dejar fuera de este agradecimiento al resto de compañeros que durante todos estos años me han acompañado dentro del grupo LabIC (Antonio Menéndez, Germán Martínez, Ascensión Medina, Miguel Pérez, Ana Jiménez del Barco, Luca Pirozzolo, Pooyan Ayar, Mari Adarve, Ana Elena Hidalgo, Juanma Castillo, Tom Mattinzioli y Paulina Leiva) de los cuales sigo aprendiendo cada día y que han estado a mi lado durante este camino creando un genial ambiente de trabajo. En este aspecto me gustaría hacer especial mención a Gema García y Jaime García, por ser los primeros en hacerme sentir parte de esta gran familia desde el día que tuve la suerte de entrar a formar parte de ella, y por ser los que más horas han tenido que aguantarme desde entonces.

Pasando al ámbito personal, quiero dar las gracias a mis amigos y familiares por demostrarme día tras día que no importa lo que te depare la vida y las veces que te caigas, siempre hay que estar dispuesto a levantarse y siempre contarás con la gente que te quiere para ayudarte a ello. Quiero agradecer especialmente a mis padres, porque no sería nada sin ellos, porque me demuestran su amor incondicional cada día y son a la vez consejeros, amigos y ejemplo constante de superación. Ni siquiera en tres vidas sería capaz de compensar una décima parte de todo lo que les debo.

En último lugar, y no por ello menos importante, agradecer al resto de personas que han contribuido, directa o indirectamente, y mediante su apoyo y comprensión en consecución de este trabajo de investigación.

RESUMEN

El incremento de las cargas y tráfico experimentado en las últimas décadas por las infraestructuras de transporte derivado de la globalización se ha traducido en un aumento de las exigencias estructurales de las mismas. Dentro del ámbito de aplicación de las mezclas bituminosas en diversas infraestructuras como pavimentos de carreteras, capas de soporte en ferrocarriles, pavimentos portuarios, entre otros, el empleo de betunes modificados con polímeros ha servido tradicionalmente para dar respuesta a dichas exigencias limitando los principales problemas que causan el deterioro prematuro de las infraestructuras. No obstante, la multiplicación de los costes de inversión que suponen dejan este tipo de soluciones fuera del alcance de la mayor parte de la red de infraestructuras y las tareas de mantenimiento que concentran el grueso de la inversión actual.

Como medida para paliar este problema, el empleo de polímeros reciclados cumple una doble función: por un lado, intentar obtener los beneficios de los polímeros a un menor coste y, por otro, contribuir a paliar el problema medioambiental derivado del aumento del consumo de plásticos en la actualidad y de la generación de residuos que este supone. Sin embargo, para lograr este objetivo es necesario dotar a las mezclas que incorporen los polímeros reciclados de unas garantías suficientes tanto desde el punto de vista técnico como económico.

Surge así la investigación recogida en la presente tesis doctoral cuyo objetivo principal consiste en el estudio de la viabilidad de incorporar polímeros reciclados en mezclas bituminosas para su uso en diversos tipos de infraestructuras de transporte, como alternativa económica y sostenible para mejorar la capacidad estructural de las mismas. Aunque diversos estudios han analizado el empleo de este tipo de material, su uso aún no está extendido, razón por la que es necesario mejorar la confianza acerca del potencial de su empleo a distintos niveles de la mezcla y durante toda su vida útil. De esta forma será posible extender su empleo a un mayor número de vías y aplicaciones.

Para la consecución de estos objetivos se ha llevado a cabo una serie de etapas de trabajo que recogen el análisis de la influencia de los polímeros reciclados en las distintas escalas en la que se puede modificar el comportamiento estructural tanto del material como de la infraestructura, así como aportando un análisis económico y ambiental para la definición de su viabilidad. Para ello, las principales etapas de estudio fueron: (i) la evaluación de la interacción entre el ligante y los polímeros reciclados como medio de determinar el proceso óptimo de modificación; (ii) el

estudio de la influencia de los polímeros reciclados en las distintas escalas de la mezcla bituminosa con el fin de mejorar la comprensión sobre los beneficios de su empleo y seleccionar los más adecuados; (iii) el análisis de la influencia del método de adición del polímero a las mezclas bituminosas; (iv) un estudio del comportamiento mecánico a largo plazo de mezclas bituminosas modificadas con polímeros reciclados aplicadas a distintos tipos de infraestructuras de transporte; (v) y un análisis estructural, de costes comparativos y potencial consumo de polímeros reciclados por parte de las mezclas que los incorporan.

Los resultados obtenidos a las distintas escalas de estudio han permitido determinar la viabilidad del empleo de polímeros reciclados de tipo polietileno de baja densidad (LDPE), polietileno lineal de baja densidad (LLDPE) con fibras y polvo de neumático al final de su vida útil (PNFVU) para la mejora estructural de distintas infraestructuras de transporte, tanto desde el punto de vista técnico, siendo capaces de obtener propiedades similares a las mezclas de altas prestaciones empleadas actualmente, como desde el punto de vista económico, con menores costes de fabricación y potenciales reducciones de espesor que invitan a extender el empleo de estas mezclas. Junto a esto, el uso de estos materiales abre una nueva vía para incrementar la tasa de reciclaje de los plásticos (reduciendo también el consumo de nuevas materias primas) ayudando a paliar uno de los problemas medioambientales más importantes de la sociedad actual.

ABSTRACT

The increase in loads and traffic experienced in recent decades by transport infrastructures derived from globalization has resulted in an increase in their structural demands. Within the scope of bituminous mixtures, the use of polymer-modified bitumen has traditionally served to meet these demands by preventing the main problems that cause premature deterioration of infrastructure. However, the increased investment costs involved leave such solutions out of the reach of most of the infrastructure network and the maintenance tasks that concentrate the bulk of today's investment.

As a measure to alleviate this problem, the use of recycled polymers plays a dual role: on the one hand, obtaining the benefits of polymers at a lower cost and, on the other hand, helping to alleviate the environmental problem arising from the increase in the consumption of plastics today and the generation of waste that this entails. Nevertheless, to achieve this objective it is necessary to provide mixtures incorporating recycled polymers with sufficient guarantees both from a technical and economic point of view.

This gives way to the research contained in this doctoral thesis whose main objective is the study of the feasibility of incorporating recycled polymers into transport infrastructures as an economical and sustainable alternative to improve their structural capacity. Although several studies have analyzed the use of this type of material, its use is not yet widespread, which is why it is necessary to improve confidence about the potential of its use at different levels of the mixture and throughout its useful life. This way it will be possible to extend its employment to a greater number of routes and applications.

To achieve these objectives, a series of work steps were carried out, including (i) the assessment of the interaction between the binder and recycled polymers as a means of determining the optimal modification process; (ii) the study of the influence of recycled polymers on the different scales of the bituminous mixture in order to improve understanding of the benefits of their use and to select the most appropriate; (iii) the study of the influence of the method of addition of the polymer to bituminous mixtures; (iv) a study of the long-term mechanical behaviour of bituminous mixtures modified with recycled polymers applied to different transport infrastructures; (v) and a structural analysis, a comparison of costs and potential consumption of recycled polymers by the mixtures incorporating them.

The results obtained at the different study scales have made it possible to determine the feasibility of the use of recycled polymers of type LDPE, LLDPE with fibres and PNFVU for the structural improvement of different transport infrastructures. Both from technically point of view, being able to obtain properties similar to the high performance mixtures currently used, as from an economic point of view, with lower manufacturing costs and potential thickness reductions that invite the use of these mixtures to be extended. Alongside this, the use of these materials opens up a new avenue to increase the recycling rate of plastics, helping to alleviate one of the most important environmental problems in today's society.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	3
RESUMEN	7
ABSTRACT	9
ÍNDICE GENERAL.....	11
Índice de Tablas.....	15
Índice de Figuras	19
1. Introducción	29
1.1 Justificación de la tesis	29
1.2 Contenido de la tesis	30
2. Estudio del Estado del Arte	35
2.1 La mezcla bituminosa en las infraestructuras de transporte.....	35
2.1.1 Mezclas bituminosas en pavimentos de carreteras.....	38
2.1.2 Mezclas bituminosas en infraestructuras ferroviarias.....	40
2.1.3 Mezclas bituminosas en pavimentos portuarios	42
2.1.4 Mejora estructural de mezclas bituminosas.....	44
2.2 Utilización de polímeros en mezclas bituminosas	45
2.2.1 Ligantes modificados con polímero	48
2.2.2. Factores que influyen en las propiedades de los ligantes modificados con polímeros	51
2.3 Reutilización de polímeros reciclados en mezclas bituminosas.....	61
2.3.1 Motivación del empleo de polímeros reciclados	61
2.3.2 Problemática de la estabilidad al almacenamiento	67
2.3.3 Problemática de la durabilidad. Envejecimiento de materiales bituminosos.....	70
2.3.4 Empleo de Polietileno (PE) reciclado	76
2.3.5 Empleo de Polipropileno (PP) reciclado	86
2.3.6 Empleo de Cloruro de polivinilo (PVC) reciclado.....	91
2.3.7 Empleo de Etilvinilacetato (EVA) reciclado	95
2.3.8 Empleo de Polvo de neumático al fin de su vida útil (PNFVU).....	99
2.3.9 Empleo de combinaciones de polímeros reciclados	107
2.3.10 Análisis comparativo de polímeros reciclados	110
2.4 Conclusiones del estado del arte. Motivación de la tesis doctoral.....	118
3. Objetivos	123
3.1 Objetivo general.....	123
3.2 Objetivos específicos.....	123

4. Metodología	127
4.1 Materiales	127
4.1.1 Polímeros reciclados	127
4.1.2 Betunes.....	131
4.1.3 Áridos	132
4.1.4 Fíller.....	134
4.1.5 Fibras	134
4.1.6 Morteros y mezclas bituminosas	134
4.2 Plan de trabajo	145
4.2.1. Evaluación de la interacción entre ligante y polímeros reciclados	146
4.2.2. Impacto del polímero reciclado a distintas escalas: ligante, mortero y mezcla bituminosa.....	155
4.2.3. Influencia del modo de adición del polímero reciclado en las características de las mezclas bituminosas: vía húmeda vs vía seca.....	160
4.2.4. Estudio del comportamiento mecánico a largo plazo de mezclas bituminosas modificadas con polímeros reciclados aplicadas a distintas infraestructuras de transporte	161
4.2.5. Análisis estructural, costes y consumo de polímeros reciclados	167
5. Análisis de Resultados	177
5.1. Evaluación de la interacción entre ligante y polímeros reciclados	177
5.1.1 Influencia del contenido de polímero incorporado	177
5.1.2. Influencia del tipo de polímero	182
5.2 Impacto del polímero reciclado a distintas escalas: ligante, mortero y mezcla bituminosa	219
5.2.1 Aplicación de ligantes modificados con polímeros reciclados a morteros bituminosos. Análisis DMA.....	219
5.2.2 Aplicación de ligantes modificados con polímeros reciclados a mezclas bituminosas	225
5.2.3 Comparativa del efecto del empleo de polímeros reciclados a distintas escalas de la mezcla bituminosa	234
5.3 Influencia del modo de adición del polímero reciclado en las características de las mezclas bituminosas: vía húmeda vs vía seca.....	240
5.4 Estudio del comportamiento mecánico a largo plazo de mezclas bituminosas aplicadas a distintas infraestructuras de transporte	243
5.4.1 Aplicación de mezclas con polímeros reciclados para la mejora estructural de carreteras	243
5.4.2 Aplicación mezclas con polímeros reciclados para la mejora estructural de infraestructuras ferroviarias	250

5.4.3 Aplicación mezclas con polímeros reciclados para la mejora estructural de infraestructuras portuarias	258
5.4.4 Evaluación global de las mezclas modificadas con polímeros reciclados para las distintas aplicaciones.	267
5.5 Análisis estructural, costes y consumo de polímeros reciclados	269
5.5.1 Análisis estructural.....	269
5.5.2 Análisis de costes	273
5.5.3 Análisis de consumo de polímeros reciclados.....	277
6. Conclusiones	281
7. Futuras líneas de investigación	287
8. Referencias bibliográficas	293
ANEXO I: DESCRIPCIÓN DE ENSAYOS.....	323

Índice de Tablas

Tabla 1. Comparativa entre distintos tipos de fílleres procedentes de materiales reciclados (Elaboración propia).....	65
Tabla 2. Métodos y aditivos empleados en la mejora de la estabilidad de betunes modificados con polímeros (Elaboración Propia).....	69
Tabla 3. Resumen de las condiciones de mezclado y características para los porcentajes más comunes de polímeros reciclados comúnmente empleados en la modificación de materiales bituminosos (Brasileiro et al., 2019).	117
Tabla 4. Granulometría del LDPE reciclado de origen doméstico.....	128
Tabla 5. Propiedades del PNFVU empleado en el trabajo de investigación.	131
Tabla 6. Características básicas de los ligantes de altas prestaciones para infraestructuras ferroviarias y portuarias.....	132
Tabla 7. Propiedades básicas de los áridos empleados en las distintas mezclas.....	133
Tabla 8. Granulometría de los morteros empleados en la tesis doctoral.	135
Tabla 9. Propiedades de las distintas mezclas estudiadas para su aplicación en carreteras....	139
Tabla 10. Porcentaje de escurrimiento de ligante registrado para las distintas mezclas.....	140
Tabla 11. Propiedades de las distintas mezclas estudiadas para su aplicación como subbalasto bituminoso.	142
Tabla 12. Propiedades de las distintas mezclas estudiadas para su aplicación como pavimento portuario.	144
Tabla 13. Plan de trabajo seguido para evaluar la dependencia del contenido de polímero reciclado en su interacción con el betún.	149
Tabla 14. Plan de trabajo seguido para evaluar la influencia del tipo de polímero reciclado en su interacción con el betún tras la fabricación del ligante modificado.	152
Tabla 15. Plan de trabajo seguido para evaluar la influencia del tipo de polímero reciclado en su interacción con el betún tras su envejecimiento.	154
Tabla 16. Parámetros analizados mediante la aplicación del análisis MSCRT al estudio de la interacción entre polímero y betún.	155
Tabla 17. Plan de ensayos realizado para la evaluación del comportamiento mecánico de morteros modificados con polímeros reciclados.....	156
Tabla 18. Plan de trabajo seguido para el diseño y caracterización mecánica de mezclas SMA 11 con polímeros reciclados.....	158
Tabla 19. Propiedades comparadas para determinar la aportación de los polímeros reciclados a distintas escalas de la mezcla.....	159
Tabla 20. Plan de trabajo realizado para la evaluación de la influencia del modo de adición del polímero reciclado.	161

Tabla 21. Plan de trabajo desarrollado para el estudio del comportamiento mecánico a largo plazo de mezclas con polímeros reciclados aplicadas en capa de rodadura.	162
Tabla 22. Plan de trabajo desarrollado para el estudio del comportamiento mecánico a largo plazo de mezclas con polímeros reciclados aplicadas como subbalasto bituminoso.	164
Tabla 23. Plan de trabajo desarrollado para el estudio del comportamiento mecánico a largo plazo de mezclas con polímeros reciclados aplicadas como subbalasto bituminoso.	166
Tabla 24. Parámetros empleados en la modelización.	169
Tabla 25. Modificación de penetración y temperatura de reblandecimiento tras la adición de distintos porcentajes de LDPE.	178
Tabla 26. Resultados de estabilidad al almacenamiento de los distintos porcentajes de LDPE reciclado.	181
Tabla 27. Resultados de estabilidad al almacenamiento de los distintos polímeros reciclados estudiados.	183
Tabla 28. Comparativa de penetración y temperatura de reblandecimiento entre los contenidos óptimos de polímeros reciclados y los betunes de referencia.	184
Tabla 29. Parámetro de susceptibilidad térmica de los distintos betunes.	188
Tabla 30. Variación de penetración y temperatura de reblandecimiento tras el envejecimiento.	196
Tabla 31. Viscosidad de los distintos ligantes tras envejecimiento y variación de la misma respecto a los originales.	197
Tabla 32. Valores de Flow Index (F), Recovery Capacity (RC) y L- Index de los distintos betunes ensayados.	213
Tabla 33. Densidad aparente de los distintos morteros.	219
Tabla 34. Comparativa entre escalas en términos de rigidez.	235
Tabla 35. Comparativa entre escalas en términos de comportamiento viscoelástico.	237
Tabla 36. Comparativa entre escalas en términos de resistencia a la humedad.	237
Tabla 37. Comparativa entre escalas en términos de resistencia a las deformaciones permanentes.	238
Tabla 38. Comparativa entre escalas en términos de resistencia a la fatiga.	239
Tabla 39. Vida hasta punzonamiento dinámico (Nf) para las dos condiciones de ensayo.	266
Tabla 40. Clasificación del empleo de mezclas para las distintas infraestructuras.	268
Tabla 41. Módulo de elasticidad de las distintas mezclas empleado en la modelización.	269
Tabla 42. Leyes empleadas en el cálculo de la resistencia del paquete de firme.	270
Tabla 43. Comparativa de coste final de fabricación y puesta en obra de las distintas mezclas.	274
Tabla 44. Coste final de las mezclas estudiadas en el dimensionamiento para una misma vida útil.	277

Índice de Figuras

Figura 1. Esquema de funcionamiento de las mezclas bituminosas en función de la temperatura y frecuencia de aplicación de la carga (Moreno-Navarro, F. & Rubio-Gámez, 2016).	35
Figura 2. Separación del betún en sus distintas fracciones, resaltadas las fracciones SARA (Speight, 2004).	36
Figura 3. Modelo coloidal del betún. Betún tipo “sol” (a). Betún tipo gel (b).	37
Figura 4. Función de las mezclas bituminosas como elemento estructural de pavimentos y capas de asiento ferroviarias.	38
Figura 5. Evolución del crecimiento del transporte en la Unión Europea de 28 países entre 1995-2014 (Nicodème et al., 2017).....	39
Figura 6. Ejemplo de problemas de fisuración, deformaciones y falta de cohesión en mezclas bituminosas de vías secundarias.....	40
Figura 7. Puesta en obra de subbalasto bituminoso en el subtramo de plataforma de alta velocidad Villodrigo (Palencia)-Villazopeque (Burgos) (Fuente: ADIF).	41
Figura 8. Evolución del tráfico de mercancías en el puerto de Hamburgo (Alemania) (Hafen-Hamburg, 2018).	42
Figura 9. Detalle del pavimento bituminoso de la terminal Tollerort del puerto de Hamburgo (Alemania).	43
Figura 10. Diferentes tipos de fibras empleados en la fabricación de mezclas bituminosas.	45
Figura 11. Planta de modificación de betunes (Hunter et al., 2015).	46
Figura 12. Esquema del proceso de modificación con polímeros por vía seca o húmeda en una planta asfáltica de tipo discontinuo (Brasileiro, Moreno-Navarro, Tauste-Martínez, Matos, & Rubio-Gámez, 2019).....	47
Figura 13. Evolución de las propiedades mecánicas del betún modificado según la interacción entre las fases de asfaltenos y de polímeros (Elaboración a partir de (Polacco et al., 2015)). ..	50
Figura 14. Esquema de la forma en la que los polímeros pueden mejorar las propiedades del betún (Elaboración propia).	51
Figura 15. Clasificación de los distintos polímeros empleados en la modificación de materiales bituminosos (Elaboración propia).	52
Figura 16. Clasificación de los plastómeros de mayor empleo en la modificación de ligantes (Elaboración propia).....	53
Figura 17. Polímero elastómero del tipo estireno-butadieno-estireno (SBS).....	55
Figura 18. Caucho natural a partir del látex procedente la salvia de árboles tropicales.	56
Figura 19. Ejemplo de pavimento con betún modificado con resina epoxi empleado en el puente San Francisco-Oakland SAS Bay. (Fuente: ChemCoSystems).....	57

Figura 20. Escenarios posibles desde el punto de vista de la proporción entre betún y contenido de polímero.....	58
Figura 21. Relación entre tiempo y temperatura para la modificación de ligantes (Elaboración propia).....	60
Figura 22. Equipos empleados en la modificación de betunes con polímeros: a) Equipo para mezclado a baja velocidad; b) Equipo para mezclado a cizalla de alta velocidad.	61
Figura 23. Ejemplo de la obtención de materiales para su empleo en mezclas bituminosas. ...	63
Figura 24. Fresado de carreteras y material fresado obtenido.....	64
Figura 25. Planta de reciclaje de plásticos.	66
Figura 26. Tanques de almacenamiento de betunes en planta de fabricación de mezclas.	67
Figura 27. Etapas en el proceso de envejecimiento de mezclas bituminosas.	71
Figura 28. Polímero termoplástico reciclado de tipo polietileno lineal de baja densidad (LLDPE, izquierda) y de alta densidad (HDPE, derecha).....	76
Figura 29. Ejemplos de fuentes de polietileno procedentes de consumo doméstico.	77
Figura 30. Ejemplo de empleo de polietileno como geomembrana en impermeabilización y distintos usos agrícolas.	78
Figura 31. Ventajas e inconvenientes del empleo de polietileno reciclado como modificador de ligantes.	79
Figura 32. Distribución del estudio de distintos porcentajes de polímeros reciclados en la bibliografía (Brasileiro et al., 2019).	80
Figura 33. Partículas de PET empleadas en la modificación por vía seca (Modarres & Hamedi, 2014).	86
Figura 34. Polímero termoplástico de tipo polipropileno (PP).	87
Figura 35. Ejemplo de distintas fuentes de polipropileno reciclado.....	87
Figura 36. Polímero termoplástico de tipo cloruro de polivinilo (PVC).	91
Figura 37. Ejemplos de fuentes de PVC reciclado.	92
Figura 38. Variación módulo complejo de rigidez (G^*) respecto del betún base para PVC reciclados de distinto origen (Behl et al., 2014; Köfteci et al., 2014).	94
Figura 39. Polímero termoplástico de tipo etil-vinil-acetato (EVA).	95
Figura 40. Ejemplo de objetos que emplean EVA.	96
Figura 41. Trituradora de neumáticos para su reutilización.	100
Figura 42. Vertedero de neumáticos en A Laracha (Galicia).....	101
Figura 43. Evolución de los tratamientos de neumático al final de su vida útil entre 1996-2015 (European Tyre & Rubber Manufactures Association, 2017).	102
Figura 44. Caucho procedente de la trituración de neumáticos en distintos tamaños.	103

Figura 45. Esquema del proceso de interacción entre caucho y betún (Bermejo-Muñoz et al., 2014).	104
Figura 46. Evolución de las características de los betunes modificados con caucho en función del tiempo de mezclado.	105
Figura 47. Extrusor de polímeros y esquema de funcionamiento.	107
Figura 48. Rangos de variación de temperaturas, tiempos y velocidades de mezclado de polímeros reciclados empleados en la modificación de betunes (Brasileiro et al., 2019).....	111
Figura 49. Reducción porcentual del valor de penetración tras la adición de distintos polímeros reciclados (Brasileiro et al., 2019).	112
Figura 50. Aumento porcentual del valor de temperatura de reblandecimiento tras la adición de distintos polímeros reciclados (Brasileiro et al., 2019).	113
Figura 51. Polietileno reciclado de uso doméstico empleado en el estudio.	128
Figura 52. Polietileno reciclado antes y después de la trituración.	129
Figura 53. Robot de cocina empleado en la trituración del polietileno de uso doméstico (a). Cuchillas empleadas para la trituración (b). Colocación del material en el vaso para su trituración (c).....	129
Figura 54. Polietileno reciclado procedente de geomembranas empleado en el estudio.	130
Figura 55. Polvo de caucho empleado en el trabajo de investigación.	131
Figura 56. Áridos de naturaleza caliza empleados en el trabajo de investigación.....	133
Figura 57. Áridos de naturaleza ofítica empleados en el trabajo de investigación.	133
Figura 58. Cemento empleado como filler de aportación en la tesis doctoral.	134
Figura 59. Fibras acrílicas empleadas en el trabajo de investigación.	134
Figura 60. Separación de la mezcla de referencia en grupos para la determinación del contenido de ligante.	136
Figura 61. Control termográfico durante el mezclado.....	136
Figura 62. Cortadora de precisión por coordenadas empleada en la obtención de las muestras a analizar.	137
Figura 63. Encaje granulométrico con ofita como árido grueso de la mezcla SMA 11 empleada.	138
Figura 64. Granulometría de la mezcla AC 22 S empleada como subbalasto bituminoso.....	142
Figura 65. Granulometría de la mezcla AC 22 S ofita empleada como pavimento de puertos.	144
Figura 66. Esquema resumen del plan de trabajo.	145
Figura 67. Reómetro dinámico de corte (DSR) para la caracterización reológica de los ligantes.	147
Figura 68. Mezclador de espas empleado en la modificación.	148
Figura 69. Esquema del proceso de mezclado empleado en la modificación de ligantes.	148
Figura 70. Mezclado previo polietileno (LDPE) y polvo de caucho (PNFVU).....	150

Figura 71. Equipo de microscopía de fuerza atómica (AFM).	151
Figura 72. Equipos RTFOT (derecha) y PAV (izquierda) empleados en el envejecimiento de los ligantes.	153
Figura 73. Equipo DMA empleado en la caracterización de los morteros bituminosos.	157
Figura 74. Compactador giratorio empleado en el análisis de trabajabilidad.	160
Figura 75. Esquema de las distintas etapas seguidas para la evaluación de comportamiento mecánico a largo plazo de mezclas bituminosas modificadas con polímeros reciclados.	162
Figura 76. Placa de punzonamiento empleada en el ensayo de subbalasto bituminoso.	165
Figura 77. Ejemplo de la reproducción de las condiciones de carga que provocan el fenómeno de punzonamiento estático en pavimentos portuarios.	167
Figura 78. Ejemplo de la reproducción de las condiciones de carga que provocan el fenómeno de punzonamiento dinámico en pavimentos portuarios.	167
Figura 79. Estructura empleada para el dimensionamiento del firme.	168
Figura 80. Evolución de la deformación en función de la distancia de aplicación al eje de carga.	170
Figura 81. Software de modelización empleados en el análisis de dimensionamiento.	170
Figura 82. Ejemplo de obtención de leyes de fatiga para el dimensionamiento.	171
Figura 83. Ejemplo de entrada de datos en el software.	172
Figura 84. Ejemplo de análisis de coste comparativo suministrado por el software.	172
Figura 85. Sección de carretera convencional empleada en la evaluación del consumo potencial de polímeros reciclados.	173
Figura 86. Porcentajes estudiados para el polímero reciclado tipo LDPE.	177
Figura 87. Evolución de la viscosidad dinámica con la temperatura para distintos porcentajes de LDPE.	178
Figura 88. Diagramas de Black de los distintos porcentajes de LDPE reciclado.	179
Figura 89. Isocronas a 5 Hz de los distintos porcentajes de LDPE reciclado.	180
Figura 90. Aglomeraciones de LDPE encontradas en el ensayo de anillo y bola de la parte superior del mayor contenido de polímero estudiado.	181
Figura 91. Valores comparativos de viscosidad dinámica a distintas temperaturas.	185
Figura 92. Diagramas de Black de los distintos ligantes modificados con polímeros reciclados y betunes de referencia.	186
Figura 93. Isocronas a 5Hz de los distintos betunes a distintas temperaturas. a) Evolución del módulo de rigidez complejo (G^*). b) Evolución del ángulo de fase (δ).	187
Figura 94. Imágenes topográficas de AFM de la microestructura de los distintos betunes.	189
Figura 95. Superficie del betún modificado con la combinación de PNFVU y LDPE.	190

Figura 96. Imágenes topográficas tridimensionales de la microestructura de los distintos betunes.....	191
Figura 97. Comparativa entre las distintas fases del betún base y el modificado con LDPE de uso doméstico.	192
Figura 98. Comparativa entre las distintas fases del betún base y el modificado con LLDPE procedente de geomembrana.	193
Figura 99. Comparativa entre las distintas fases de los dos tipos de polietileno reciclado estudiados.	193
Figura 100. Comparativa entre las distintas fases del betún base y el modificado con la combinación de polietileno y caucho reciclados.	194
Figura 101. Aspecto de los ligantes base y modificados tras los ensayos RTFOT y PAV.	195
Figura 102. Diagramas de Black de los distintos ligantes tras el proceso de envejecimiento..	198
Figura 103. Isocronas a 5Hz de los distintos betunes envejecidos a distintas temperaturas. a) Evolución del módulo de rigidez complejo (G^*). b) Evolución del ángulo de fase (δ).	199
Figura 104. Crossover-Frequency y R-value de los distintos ligantes antes y después del envejecimiento.....	201
Figura 105. Representación de Glove-Rowe parameter de los distintos ligantes antes y después del envejecimiento.....	203
Figura 106. Imágenes topográficas de AFM de la microestructura de los distintos betunes tras su envejecimiento (RTFOT + PAV).....	204
Figura 107. Imágenes topográficas tridimensionales de la microestructura de los distintos betunes tras su envejecimiento.	205
Figura 108. Comparativa entre las fases del betún base (B 50/70) antes y después del envejecimiento (RTFOT + PAV).	206
Figura 109. Comparativa entre las fases del betún modificado con polietileno de uso doméstico (LDPE) antes y después del envejecimiento (RTFOT + PAV).	207
Figura 110. Comparativa entre las fases del betún modificado con polietileno procedente de geomembrana (LLDPE GEO) antes y después del envejecimiento (RTFOT + PAV).	208
Figura 111. Comparativa entre las fases del betún modificado con la combinación de polietileno (LDPE) y caucho (PNFVU) reciclados antes y después del envejecimiento (RTFOT + PAV).....	209
Figura 112. Porcentaje de recuperación (%R) y parámetro Jnr3.2 kPa obtenidos del ensayo MSCR a distintas temperaturas.....	210
Figura 113. Resultados obtenidos para el ensayo MSCR a 45 °C empleando la metodología de análisis de Moreno-Navarro et al. (2019).	212
Figura 114. Evolución de los resultados obtenidos para el ensayo MSCR a 45 °C, 70 °C y 45 °C tras RTFOT +PAV empleando la metodología de análisis de Moreno-Navarro et al. (2019)....	214
Figura 115. Representación de la susceptibilidad de los distintos ligantes debido a las condiciones ambientales: temperatura (T-Index) y envejecimiento (A-Index).	217

Figura 116. Representación de la susceptibilidad de los distintos ligantes al tráfico (L-index) y a las condiciones ambientales (AM-Index) clasificando por tipo de clima y tráfico.	218
Figura 117. Evolución de la rigidez promedio de los distintos morteros a las distintas cargas.	220
Figura 118. Valores promedio de módulo y módulo conservado para el máximo nivel de carga.	222
Figura 119. Valores promedio de ángulo de fase y ángulo conservado para el máximo nivel de carga.	223
Figura 120. Leyes de fatiga de los distintos morteros ensayados.	223
Figura 121. Aspecto de las muestras de mortero de los distintos ligantes tras su ensayo a fatiga.	224
Figura 122. Ciclos de carga hasta rotura y vida de fatiga conservada para el máximo nivel de carga.	225
Figura 123. Resultados de resistencia a tracción indirecta y sensibilidad al agua de las distintas mezclas estudiadas.	226
Figura 124. Aspecto de la rotura para el grupo húmedo de las mezclas combinación de LDPE + PNFVU.	227
Figura 125. Resultados de módulo de rigidez a distinta temperatura de las distintas mezclas estudiadas.	228
Figura 127. Evolución de la profundidad de rodera con los ciclos del ensayo de rodadura para las distintas mezclas.	229
Figura 128. Pendiente media de la deformación en pista WTS aire para las distintas mezclas.	230
Figura 129. Evolución de la resistencia promedio a la fisuración de las distintas mezclas para distintas temperaturas.	231
Figura 130. Deformación horizontal inicial para distintas temperaturas.	233
Figura 131. Evolución del parámetro medio de daño para distintas temperaturas.	234
Figura 132. Comparativa de trabajabilidad entre mezclas modificadas con polímeros de tipo LDPE.	241
Figura 133. Determinación del número de giros para las distintas tipologías de mezcla.	242
Figura 134. Resistencia promedio a tracción indirecta a 25°C para un mismo contenido de huecos.	242
Figura 135. Aspecto de las distintas mezclas tras su rotura a tracción indirecta.	243
Figura 136. Evolución de la resistencia promedio a la fisuración de las distintas mezclas para distintos niveles de carga.	244
Figura 137. Leyes de fatiga de las distintas mezclas estudiadas en función de la deformación inicial registrada.	245
Figura 138. Evolución del parámetro medio de daño para distintos niveles de carga.	246
Figura 139. SMA 11 con B50/70 tras rotura.	247

Figura 140. SMA 11 con PMB 45/80-65 y 0.3 % Fibras tras rotura.....	247
Figura 141. SMA 11 con LDPE de consumo doméstico tras rotura.....	247
Figura 142. SMA 11 con LLDPE procedente de geomembrana tras rotura.	247
Figura 143. SMA 11 con LDPE y PNFVU tras rotura.	247
Figura 144. Aspecto de las distintas mezclas tras el ensayo SATS.	248
Figura 145. Rigidez y saturación retenidas para el ensayo SATS de las distintas mezclas.....	248
Figura 146. Valores promedio de módulo e índices de durabilidad de las distintas mezclas tras el ensayo SATS.....	249
Figura 147. Resultados de resistencia a tracción indirecta y sensibilidad al agua para las mezclas estudiadas como subbalasto bituminoso.....	250
Figura 148. Módulo de rigidez promedio a distintas temperaturas de las mezclas empleadas como subbalasto bituminoso.....	252
Figura 149. Evaluación de la deformación permanente a 40 °C de las distintas mezclas mediante el ensayo de compresión triaxial cíclico.	253
Figura 150. Leyes de fatiga de las distintas mezclas estudiadas para su empleo como subbalasto bituminoso.....	254
Figura 151. Energía inicial disipada para distintos niveles de carga.	255
Figura 152. Evolución del punzonamiento de las distintas mezclas estudiadas.....	256
Figura 153. Índices de resistencia al punzonamiento a corto y largo plazo.	257
Figura 154. Módulo de rigidez promedio a distintas temperaturas de las mezclas empleadas como pavimento portuario.	259
Figura 155. Evolución de la deformación para el punzonamiento estático a una presión de 2.6 MPa.	260
Figura 156. Evolución de la deformación para el punzonamiento estático a una presión de 5.2 MPa.	261
Figura 157. Aspecto de la mezcla tras su ensayo a punzonamiento estático.....	261
Figura 158. Límite de resistencia a punzonamiento estático (LRPE) de las distintas mezclas estudiadas.	262
Figura 159. Coeficiente de punzonamiento de las distintas mezclas estudiadas.	263
Figura 160. Evolución del punzonamiento dinámico a carga constante de las distintas mezclas.	264
Figura 161. Evolución del punzonamiento dinámico a carga creciente de las distintas mezclas.	265
Figura 162. Aspecto de la muestra tras el ensayo de punzonamiento dinámico.	266
Figura 163. Comparativa entre las deformaciones a tracción en la capa inferior de la mezcla proporcionadas por los dos programas empleados.....	270

Figura 164. Comparativa entre el número de ciclos hasta fallo en función del programa empleado.	271
Figura 165. Reducción del espesor del paquete de firme para la mezcla con geomembrana reciclada.	272
Figura 166. Reducción del espesor del paquete de firme para la mezcla con combinación de polietileno y caucho reciclados.	272
Figura 167. Comparativa costes producción entre mezcla con polímero reciclado y mezcla con betún modificado en refinería.	275
Figura 168. Distribución porcentual comparativa de los costes de fabricación.	276

Introducción

Introduction

1. Introducción

1.1 Justificación de la tesis

Las mezclas asfálticas son habitualmente empleadas como elemento estructural en infraestructuras del transporte, tales como pavimentos bituminosos o formación de capas de asiento con mayor capacidad portante. Dichas mezclas cumplen un propósito tanto estructural, para soportar y transmitir las cargas del tráfico a las capas inferiores, como funcional para mejorar las condiciones de seguridad y confort asociadas a la protección e impermeabilización de las capas subyacentes y a la obtención de una superficie regular y uniforme. En la actualidad los niveles de desarrollo alcanzados y la instauración de una sociedad globalizada han dado lugar a un incremento en el volumen de tráfico y en las cargas a las se ven sometidos las infraestructuras de transporte, precisando estas una mayor resistencia. Por otro lado, la mayor parte de los países desarrollados cuentan con una red de comunicaciones terrestres ejecutada casi en su totalidad. De este modo, los esfuerzos se centran ahora en preservar la inversión realizada durante todos estos años a través de actuaciones de conservación que, a menudo, se traducen en tareas de refuerzo de infraestructuras ya existentes

Por este motivo, es necesario el desarrollo de mezclas asfálticas que, por un lado, tengan una mayor durabilidad y, por otro, sean válidas para su empleo en tareas de rehabilitación. Para ello, dichas mezclas deben poseer una adecuada capacidad portante y una mayor resistencia a fenómenos climáticos y a la reflexión de defectos de las capas subyacentes deterioradas. Además, la nueva solución debe resultar económica, técnica y medioambientalmente competitiva.

Para solventar este problema, desde hace años es común el empleo de ligantes modificados con polímeros que permitan incrementar la resistencia a la deformación de la capa bituminosa cuando ésta está sometida a temperaturas altas, sin que por otra parte esto conduzca a una respuesta excesivamente frágil a bajas temperaturas. Sin embargo, su elevado coste limita su uso a vías de gran volumen de tráfico o zonas con altos gradientes térmicos, dejando fuera vías secundarias y urbanas pese a constituir estas una importante proporción de la red de transporte y concentrar la mayoría de desplazamientos.

De manera paralela, en los últimos años el sector de la construcción ha evolucionado hacia una mayor concienciación medioambiental, fruto de la cual se ha incrementado el empleo de materiales reciclados y reutilizados procedentes tanto del propio sector como de otros procesos

productivos. Estos son aplicados a todos los niveles de las mezclas asfálticas (áridos, ligante y filler) como medida para reducir el coste en materias primas y reducir el impacto ambiental de las mismas.

En este sentido, el empleo de polímeros reciclados de distinto origen como modificador del ligante ha demostrado ser capaz de dotar a las mezclas de una mejora en sus propiedades mecánicas similar a la alcanzada por los betunes modificados tradicionales. Mediante su empleo se obtienen ligantes con mayores ventajas de carácter medioambiental (derivadas del aprovechamiento de residuos) de una forma económicamente competitiva. De este modo, se contribuye a establecer una estrategia de economía circular, se preservan los recursos naturales disponibles y se contribuye a paliar uno de los mayores problemas a los que se enfrenta la sociedad actual: el consumo y eliminación de productos plásticos.

A pesar de que muchos estudios han analizado la posibilidad del empleo de polímeros reciclados, es interesante evaluar no solo las características de estos materiales en el momento de su puesta en obra, sino su evolución en el tiempo mediante la simulación de su comportamiento a largo plazo, debido a los procesos de deterioro y envejecimiento a los que se ven sometidos, así como su influencia en el comportamiento estructural de la infraestructura. Con ello, se garantizaría la rentabilidad del empleo de estos materiales y el uso efectivo de los mismos en distintas infraestructuras de transporte.

En base a ello, surge la motivación de esta tesis doctoral centrada en el estudio de viabilidad del uso de polímeros reciclados para la mejora estructural de infraestructuras de transporte. Así, a través del análisis de las condiciones óptimas de incorporación y el efecto de los polímeros en el comportamiento de las mezclas bituminosas a distinta escala y durante toda su vida útil, será posible incrementar el grado de confianza en esta tecnología. Esto permitirá la extensión de su empleo a un mayor número de vías e infraestructuras de transporte a la vez que se contribuye a paliar un importante problema medioambiental.

1.2 Contenido de la tesis

El presente documento de tesis doctoral se encuentra estructurado en ocho capítulos en los cuales se recoge el trabajo desarrollado durante la realización de la misma. Este primer capítulo contiene una breve justificación de los motivos detrás de la realización de esta tesis la cual se centra en el estudio de la viabilidad del empleo de polímeros reciclados para la mejora

estructural de infraestructuras de transporte. Junto a esta, en este apartado se incluye una descripción del contenido desarrollado en cada sección del documento.

En el segundo capítulo, se encuentra recogido el estudio del estado del arte llevado a cabo con el fin de revisar los conocimientos relacionados con el empleo de polímeros como elemento modificador de las mezclas asfálticas y la evolución de este tipo de materiales durante su vida útil considerando su resistencia a procesos de envejecimiento. Para lograr este objetivo, se muestra en primer lugar una descripción del empleo actual de las mezclas bituminosas en distintas aplicaciones dentro de las infraestructuras de transporte. Tras ello, se incluye una revisión de los distintos polímeros empleados actualmente en mezclas asfálticas analizando los factores que influyen en el proceso de modificación. Una vez establecida la importancia actual del empleo de materiales reciclados, se incluye una revisión de los distintos polímeros reciclados analizando dosificaciones, condiciones de mezclado, limitaciones, envejecimiento, costes y propiedades mecánicas aportadas. Fruto de dicha revisión se seleccionaron polímeros más adecuados a estudiar durante el desarrollo de la presente tesis y los aspectos mecánicos donde es necesario ahondar para garantizar un buen comportamiento durante su vida de servicio que mejora la confianza en este tipo de tecnología.

En un tercer capítulo, se presenta el objetivo principal a conseguir mediante la realización de la presente tesis doctoral el cual se deriva de manera directa de la revisión del estado del arte previamente realizada. Junto a este, se presentan distintos objetivos específicos formulados como hitos a alcanzar para la consecución del objetivo principal.

El cuarto capítulo, se centra en la explicación de la metodología seguida para la evaluación de los distintos materiales bituminosos modificados con polímeros reciclados y su posterior caracterización, tanto a nivel de ligante y morteros bituminosos, como dentro de las mezclas aplicadas en distintas infraestructuras de transporte. Para ello, esta sección contiene una descripción de los materiales empleados, así como del plan de trabajo llevado a cabo durante el desarrollo de la tesis doctoral fijado para la consecución de los distintos objetivos establecidos a partir de la revisión del estado del conocimiento. Dentro del plan de trabajo, se incluyen distintas etapas de estudio correspondientes a la fabricación y caracterización de ligantes modificados con polímeros reciclados, así como, su posterior utilización en mezclas bituminosas aplicadas a distintas infraestructuras de transporte.

Tras este, el capítulo cinco presenta los resultados obtenidos en las diferentes etapas fijadas para el estudio de la viabilidad del empleo de polímeros reciclados para la mejora estructural de infraestructuras de transporte. Durante la exposición de estos resultados, se incluye el análisis

y discusión de los mismos, considerando para ello otros estudios relacionado y los objetivos de las distintas aplicaciones en infraestructuras que se consideran en esta tesis doctoral. Dicho análisis está centrado en el desarrollo de las soluciones óptimas empleando los distintos polímeros y la evaluación de las mezclas que los emplean durante toda su vida útil y a distintos niveles: desde el ligante modificado (mediante el estudio de su reología y microestructura), pasando por un nivel intermedio como es el mortero bituminoso, hasta llegar a su empleo en mezclas bituminosas aplicadas a carreteras, infraestructuras ferroviarias o infraestructuras portuarias.

Una vez analizados los resultados obtenidos en las distintas etapas, el capítulo seis recoge las conclusiones extraídas durante el desarrollo de la presente tesis doctoral, las cuales dan respuesta a los objetivos marcados al comienzo de la investigación.

Junto a estos, el séptimo capítulo expone una serie de futuras líneas de investigación susceptibles de ser desarrolladas en próximos trabajos. Dichas líneas surgen a partir de los conocimientos adquiridos durante la realización de esta tesis y tratan de completar el conocimiento acerca del empleo de polímeros reciclados para la mejora estructural de distintas infraestructuras de transporte.

Por último, el capítulo final de este documento recoge todas las referencias bibliográficas consultadas durante el desarrollo de la presente tesis doctoral. Se incluye junto a esta un anexo en el que se describen las técnicas y ensayos llevados a cabo para la evaluación de los materiales estudiados a las distintas escalas y para las diferentes aplicaciones.

Estudio del Estado del arte

State of the Art

2. Estudio del Estado del Arte

2.1 La mezcla bituminosa en las infraestructuras de transporte

Las mezclas bituminosas son, atendiendo a su comportamiento mecánico, materiales viscoelásticos cuya respuesta depende en gran medida del tipo y magnitud de carga aplicada, por un lado, y de la temperatura de servicio a la que se ven sometidas por otro (Nguyen, Di Benedetto, & Sauzéat, 2015). Como resultado de esto, a altas temperaturas o bajas frecuencias de aplicación de carga, los materiales bituminosos se comportan de manera más viscosa (comportamiento más dúctil), siendo más susceptibles a la fluencia y a la aparición de deformaciones plásticas. Por el contrario, cuando la temperatura de servicio es baja o las cargas se aplican a altas frecuencias, el comportamiento del material tiende a ser más elástico (lo que incrementa el riesgo de fractura frágil) y, por tanto, presentará una mayor capacidad de resistir tensiones sin fluir (Moreno-Navarro, F. & Rubio-Gámez, 2016).

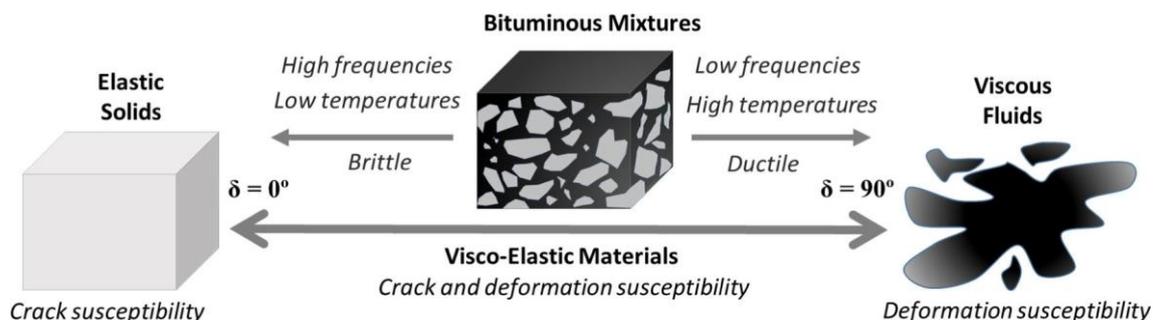


Figura 1. Esquema de funcionamiento de las mezclas bituminosas en función de la temperatura y frecuencia de aplicación de la carga (Moreno-Navarro, F. & Rubio-Gámez, 2016).

Las mezclas asfálticas están formadas por una combinación de áridos con ligante bituminoso. Los áridos, de diferentes tamaños, constituyen el esqueleto mineral del material dotándolo de resistencia a esfuerzos de compresión. Por su parte, el ligante garantiza la cohesión (a través del mástico que forma junto al fíller) entre los áridos haciendo que el material se comporte como un conjunto, y aporta la resistencia a los esfuerzos de tracción y cortantes (Moreno-Navarro, F., Sol-Sánchez, Jiménez del Barco, & Rubio-Gámez, 2017). Pese a que en torno al 95% de la mezcla está constituido por los áridos y el fíller, el ligante con un porcentaje aproximado del 5% juega un papel clave en la mezcla bituminosa. Esto se debe a que este condiciona en gran medida el citado comportamiento visco-elástico, el cual es clave en la respuesta de la mezcla frente a procesos de deformación y fisuración, las dos principales causas de su fallo estructural.

Actualmente el ligante más empleado es el betún, un material hidrocarbonado producido a través de la eliminación de las fracciones más ligeras (como el gas petróleo líquido, gasolina o diésel) del crudo de petróleo durante el proceso de refinado (Hunter, Self, Read, & Hobson, 2015). Aunque este material también se emplea por sus características impermeabilizantes en tareas de aislamiento y sellado, su principal uso es la fabricación de mezclas bituminosas (en torno al 85% de su consumo total) (Eurobitume and the Asphalt Institute, 2015).

En su estudio, el betún se ha entendido tradicionalmente como un sistema coloidal en el que micelas de alta polaridad y peso molecular conocidas como asfaltenos (partículas sólidas responsables de la adhesividad con los áridos) permanecen en un ambiente de aceites de bajo peso molecular denominados maltenos (los cuales son responsable de la fluidez del ligante) (Thurston & Knowles, 1941). En modelos del betún más recientes, los asfaltenos se entienden como una dispersión de nano partículas (formadas por la suma de varias moléculas de asfaltenos) en forma de “islas” o conjuntos de islas dentro de la fase de maltenos.

Estos pueden dividirse a su vez en saturados, aromáticos y resinas (Figura 1) (Tauste, Moreno-Navarro, Sol-Sánchez, & Rubio-Gámez, 2018b). Las resinas son los agentes dispersantes o peptizantes de los asfaltenos y, combinados con el resto de fracciones producen las condiciones para la fluencia asfáltica. La temperatura de transición cristalina de los maltenos y el contenido efectivo de asfaltenos (la cantidad de asfaltenos dispersos y resinas) son las principales propiedades que enlazan la estructura del betún con su comportamiento y reología (ductilidad a una determinada temperatura o frecuencia) (Lesueur, 2009).

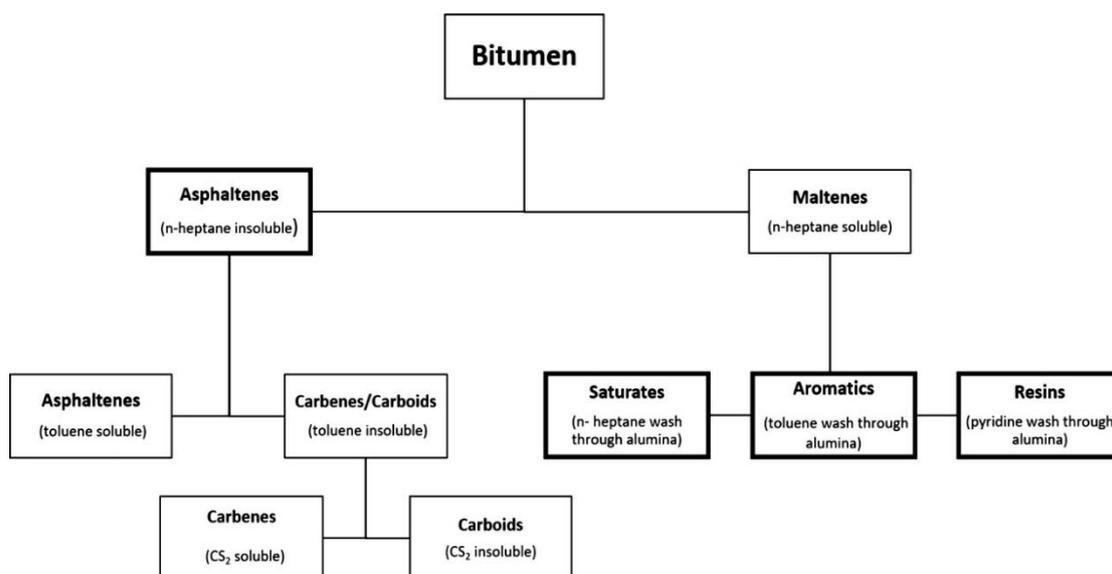


Figura 2. Separación del betún en sus distintas fracciones, resaltadas las fracciones SARA (Speight, 2004).

La proporción entre resinas y asfaltenos determina, en términos del tradicional modelo coloidal y para verlo de manera simplificada, el carácter de solución (“sol”, con un comportamiento casi puramente de maltenos y modos de relajación rápidos (Figura 3a)) o gelatinoso (“gel”, con un contenido elevado de asfaltenos y modos de relajación muy lentos (Figura 3b)) del betún (Lu, Xiaohu & Isacsson, 2002; Chávez-Valencia & Hernández-Barriga, 2009; Zhang, H. L., Yu, Feng, Xue, & Wu, 2012; Orencio-Marrón, García-Carretero, Rubio, & Jiménez, 2013).

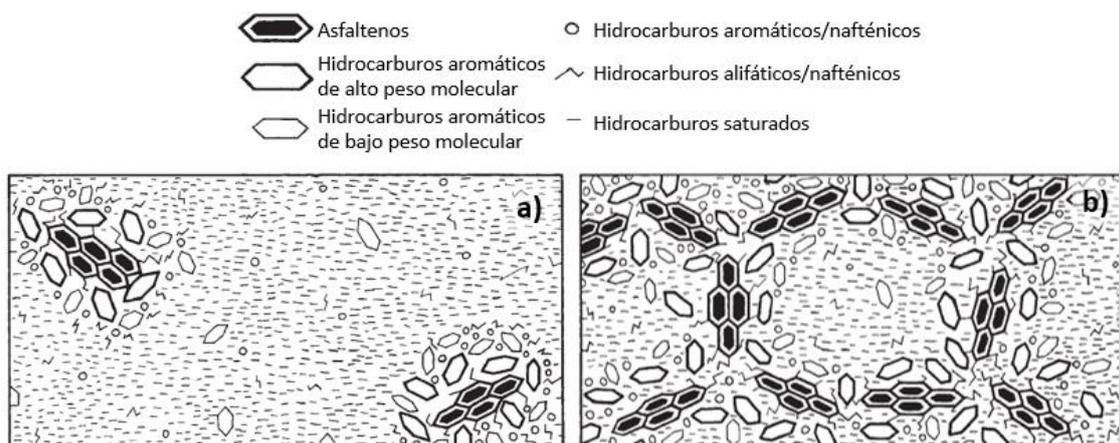


Figura 3. Modelo coloidal del betún. Betún tipo “sol” (a). Betún tipo gel (b).

El modelo micro estructural por su parte, ofrece una forma distinta de entender la estructura del betún, describiéndola como una solución compleja de moléculas hidrocarbonadas de gran diversidad de pesos moleculares y polaridad distribuidas uniformemente, siendo estas características clave para entender los cambios producidos en el betún (Gaskin, 2013). Normalmente, el análisis químico de este se lleva a cabo de acuerdo con el tipo de moléculas que lo componen más que a través de la evolución de cada componente químico concreto, ya que existen miles distintos dentro de la composición del betún (Robertson et al., 1991; Petersen, 2009). La proporción en la cual los distintos tipos de moléculas están presentes en el betún determinarán su comportamiento y condicionarán en última instancia las propiedades de la mezcla bituminosa.

Las mezclas bituminosas juegan un importante papel como elemento estructural dentro de las infraestructuras del transporte, tales como pavimentos bituminosos en carreteras y puertos o formación de capas de asiento con mayor capacidad portante para la sección ferroviaria. Dichas mezclas tienen tanto una función estructural, para soportar y transmitir las cargas del tráfico a las capas inferiores, como funcional para mejorar las condiciones de seguridad y confort asociadas a la protección e impermeabilización de las capas subyacentes y a la obtención de una

superficie regular y uniforme. Así, estos materiales desempeñan un papel fundamental en la durabilidad y funcionalidad de las infraestructuras del transporte.

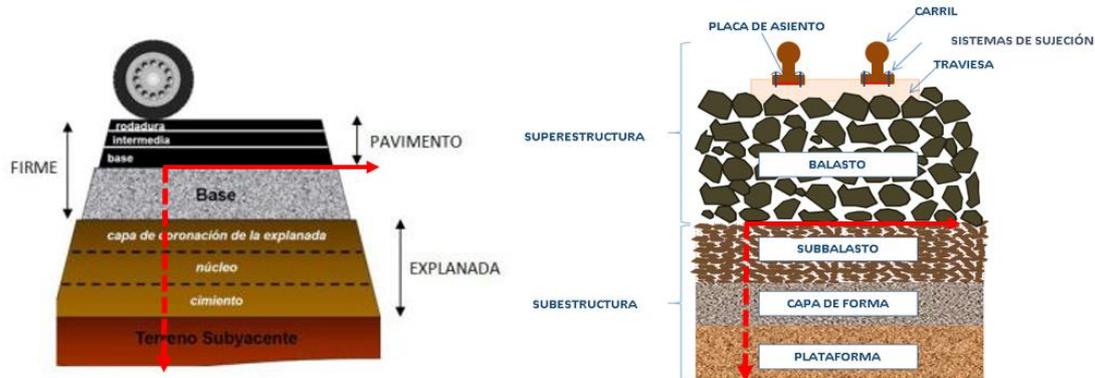


Figura 4. Función de las mezclas bituminosas como elemento estructural de pavimentos y capas de asiento ferroviarias.

En los siguientes apartados, se incluye una descripción de los principales retos a los que se enfrentan las mezclas bituminosas en su aplicación en distintas infraestructuras de transporte, así como los principales problemas que condicionan la capacidad estructural de las mismas.

2.1.1 Mezclas bituminosas en pavimentos de carreteras

Dentro del ámbito de las carreteras, el considerable incremento en la intensidad del tráfico y las cargas transmitidas por este en las últimas décadas ha conducido a una mayor tasa de deterioro de las mezclas empleadas, problema que se acentúa en el caso de mezclas diseñadas para pavimentos flexibles o en zonas de importantes gradientes térmicos (Polacco, Filippi, Merusi, & Stastna, 2015; Gogoi, Biligiri, & Das, 2016). Un buen ejemplo lo encontramos en la Figura 5, en la que podemos ver la evolución del transporte desde 1995 hasta 2014 dentro de la zona euro en términos de número de pasajeros y mercancías, por kilómetro y producto interior bruto. En cualquiera de estos aspectos se puede apreciar cómo existe una tendencia alcista que se sitúa en torno al 1.5-2% anual (Nicodème et al., 2017).



Source: Eurostat

Notas:

(1): turismos, vehículos de dos ruedas motorizados, autobuses y autocares, tranvías y metro, ferrocarril, dentro del espacio aéreo y marítimo de la UE.

(2): carretera, ferrocarril, vías navegables interiores, oleoductos, dentro del espacio aéreo y marítimo de la UE.

PIB: Producto Interior Bruto a precios y tasas de cambio constantes de 2005.

Figura 5. Evolución del crecimiento del transporte en la Unión Europea de 28 países entre 1995-2014 (Nicodème et al., 2017).

Debido a este incremento en el volumen de tráfico, las mezclas bituminosas empleadas requieren un mejor comportamiento mecánico a fin de no reducir su vida de servicio. De otro modo, se incrementa la frecuencia en la que son necesarias actuaciones de mantenimiento o incluso la completa sustitución de las capas dañadas. La importancia del mantenimiento es un tema de creciente interés dentro de las infraestructuras de transporte, ya que en los países desarrollados la mayoría de la red de infraestructuras se encuentra plenamente establecida. Por este motivo, el esfuerzo de las administraciones se centra principalmente en programas de rehabilitación de las infraestructuras ya construidas que permita sacar el mayor rédito de las inversiones realizadas.

Por otra parte, la mayor parte de la red en países desarrollados se compone de vías de tráfico medio o ligero como las vías secundarias y regionales (Moreno-Navarro, F., Sol-Sánchez, & Rubio-Gámez, 2017). En 2013, este tipo de vías suponían el 98% de la red en Francia, 77% en Alemania, 90% en Italia, el 96% en España y el 87% en Reino Unido (Nicodème et al., 2017). Debido a ello, la aplicación de mezclas bituminosas de mejores características y el desarrollo de cuidados programas de rehabilitación y tareas de mantenimiento para estas vías es un problema de creciente interés de cara al futuro.

La consecución de este tipo de tareas por otra parte, suele conllevar la realización de capas de refuerzo de espesor reducido (de manera que se abaraten costes) pero que deben tener una capacidad portante adecuada (para la que es necesaria una mayor rigidez) y no reflejar los problemas preexistentes que dan lugar a la actuación.

Dentro de los problemas más comunes en mezclas bituminosas están la aparición de deformaciones plásticas a altas temperaturas, la fisuración por fatiga (debida a la repetitiva aplicación de carga) y problemas de cohesividad y adhesividad entre el ligante y los áridos vinculados a la acción del agua (Figura 6). Junto a estos, es también común la aparición de fisuración térmica por la falta de flexibilidad a bajas temperaturas (Lu, Xiaohu, Isacsson, & Ekblad, 2003; Cuadri, García-Morales, Navarro, & Partal, 2014; Hunter et al., 2015). Para solventar estos problemas, la mezcla empleada deberá tener una menor susceptibilidad a los cambios de temperatura, una mayor capacidad portante y una alta adhesividad con los áridos empleados (Kalantar, Karim, & Mahrez, 2012).



Figura 6. Ejemplo de problemas de fisuración, deformaciones y falta de cohesión en mezclas bituminosas de vías secundarias.

2.1.2 Mezclas bituminosas en infraestructuras ferroviarias.

En el ámbito del transporte ferroviario, el continuo incremento en las velocidades de los trenes y la capacidad de carga de los mismos ha conducido a la necesidad de mejorar la subestructura de la vía añadiendo capas granulares de mayor rigidez como el subbalasto, entre el balasto y la plataforma (Pita, 2010; Sol-Sánchez, Pirozzolo, Moreno-Navarro, & Rubio-Gámez, 2015). El empleo de este tipo de capas busca alargar la vida de servicio de la infraestructura y minimizar

la necesidad de actuaciones de mantenimiento, siendo aplicable tanto a las líneas de pasajeros como a las de mercancías (Cardona, Di Benedetto, Sauzeat, Calon, & Saussine, 2016).

Dentro de esto, y con el objetivo de limitar el espesor de la capa granular a añadir para lograr la capacidad portante y protección de las capas inferiores requeridos (minimizando con ello también el consumo de los áridos de alta calidad necesarios) sin comprometer la durabilidad, surge como alternativa el empleo de mezclas bituminosas como sustituto de las capas granulares convencionales, en lo que se denomina subbalasto bituminoso. Este tipo de soluciones son cada vez más adoptadas en la construcción de nuevas vías (sobre todo en vías de alta velocidad) en países como Estados Unidos (322 km entre 2006 y 2016 en el medio oeste, (Cardona et al., 2016)), Japón o Italia y con experiencias en otros países como Austria, Francia o España (Teixeira, Ferreira, Pita, Casas, & Bachiller, 2009; Rose, Teixeira, & Veit, 2011).



Figura 7. Puesta en obra de subbalasto bituminoso en el subtramo de plataforma de alta velocidad Villodrigo (Palencia)-Villazopeque (Burgos) (Fuente: ADIF).

Para su construcción se suelen emplear mezclas bituminosas densas similares a las empleadas en pavimentos de carreteras, aunque con un contenido de ligante algo mayor y un menor contenido de huecos. Con ello, se logra un mayor grado de impermeabilización de las capas inferiores sin que el incremento de betún repercuta en las deformaciones permanentes gracias al elemento disipador de tensiones que constituye el balasto. El empleo de este tipo de solución permite una respuesta más homogénea de la vía (CENIT, 2005) y resulta económicamente más interesante que el subbalasto granular (ya que este demanda de áridos con una mayor resistencia al desgaste que los empleados en mezclas bituminosas) a partir de distancias de disponibilidad este tipo de árido superiores a 60-80 km.

Por todo ello, el empleo de mezclas de altas prestaciones modificadas con polímeros puede ser una alternativa interesante ya que permite alcanzar las capacidades portantes necesarias,

reduce la susceptibilidad térmica de las mezclas convencionales disminuye las vibraciones y el ruido generado por el paso de los trenes mejorando la calidad de la vía y el confort del viaje (Sol-Sánchez, Pirozzolo, Moreno-Navarro, & Rubio-Gámez, 2016), especialmente si los polímeros aportan un componente elástico, y la disponibilidad de sus materiales componentes es mayor.

2.1.3 Mezclas bituminosas en pavimentos portuarios

En relación con las infraestructuras portuarias, la globalización de los mercados ha provocado un importante incremento en el transporte de bienes y mercancías, que ha tenido un impacto considerable sobre el transporte marítimo (se estima que el transporte de contenedores se incrementa cada año un 10% (Noelting, Arnold, & Jones, 2005)). A modo de ejemplo, en la Figura 8 se puede observar la evolución en el transporte de mercancías en el puerto de Hamburgo, uno de los mayores del mundo.

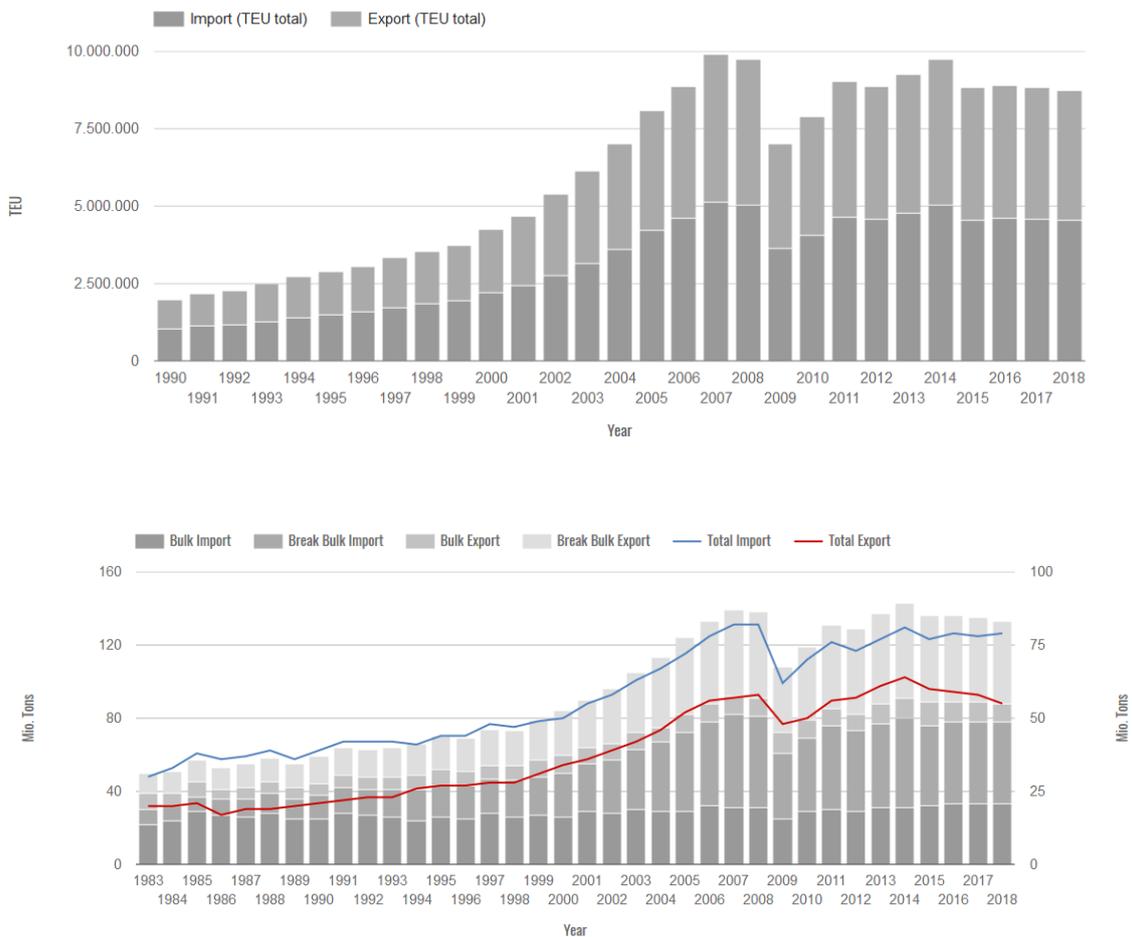


Figura 8. Evolución del tráfico de mercancías en el puerto de Hamburgo (Alemania) (Hafen-Hamburg, 2018).

Este continuo aumento de tráfico de mercancías conduce a una continua necesidad de expansión y rehabilitación de los pavimentos existentes en los puertos y de los viales de acceso y salida de los mismos. Junto a este incremento de mercancías, el modelo de negocio de los puertos está sufriendo una modificación en los últimos tiempos hacia la mayor movilidad posible de las mercancías en lugar del almacenaje de las mismas por largo tiempo. Esto lleva a la necesidad de una mayor operatividad, reduciendo la necesidad de pavimentos con capacidades portantes muy elevadas como las aportadas por el hormigón, pero que limitan este aspecto de la explotación (el número de contenedores apilados puede ser de hasta seis).

Por el contrario, existe la necesidad de pavimentos cada vez más versátiles y sofisticados (automatizados), capaces de adaptarse a diferentes usos (almacenamiento, zonas de parking, zonas de tránsito, etc.) y de ser construidos y mantenidos de forma modular en cortos periodos de tiempo sin que el coste sea excesivo por un sobredimensionamiento de los mismos.

En este sentido, el empleo de pavimentos bituminosos se postula como una solución muy competitiva para satisfacer las nuevas necesidades de las autoridades portuarias. No obstante, para garantizar un buen comportamiento de las mezclas bituminosas en este tipo de pavimentos, será necesario establecer unos criterios de diseño diferentes a los utilizados en mezclas empleadas en otro tipo de aplicaciones como las carreteras. Dichos criterios deberán estar basados en resistir tanto el punzonamiento estático producido por el apilado de contenedores, como los impactos dinámicos en la descarga de los mismos o las cargas cuasi-estáticas a baja velocidad que transmiten los “shuttle carrier” o “reach stackers”, y que tienen como resultado importantes deformaciones plásticas (roderas).



Figura 9. Detalle del pavimento bituminoso de la terminal Tollerort del puerto de Hamburgo (Alemania).

No obstante, es necesario resaltar que la experiencia adquirida en carreteras y los nuevos materiales desarrollados para éstas (aditivos, modificadores, etc.), pueden hacer que los pavimentos bituminosos sean también competitivos en puertos permitiendo un mejor mantenimiento y un menor coste que los pavimentos de hormigón. En este sentido existen diversas experiencias del empleo de mezclas bituminosas en puertos como el de las terminales Burchardkai o Tollerot del puerto de Hamburgo (Butz, Nölting, & Arnold, 2010) o puertos como los de Baltimore, New Jersey, Seattle o Tacoma en Estados Unidos que emplean por lo general mezclas de tipo SMA modificadas con polímeros. Sin embargo, la posibilidad de estudiar mezclas alternativas que resulten más económicas y sean más sostenibles (por ejemplo, a través del empleo de materiales como los polímeros reciclados) en su aplicación a puertos es una vía de investigación en la que aún cabe desarrollo.

2.1.4 Mejora estructural de mezclas bituminosas.

Como se ha comentado anteriormente, el ligante empleado determina en buena medida la consecución de las necesidades estructurales previamente definidas. No obstante, son pocos los crudos capaces de dar lugar a un betún de altas prestaciones a pesar de que los procesos de selección del crudo y los procesos de refinado han ido mejorando la calidad de estos. En términos generales, los betunes convencionales han sido capaces de satisfacer las necesidades de las mezclas bituminosas empleadas en un gran número de aplicaciones y condiciones climáticas (Hunter et al., 2015). Procesos como la adición de agentes fluidificantes o aceites o el empleo de procesos de inyección de aire han permitido actuar sobre los crudos originales para adaptar su dureza y generar betunes de este tipo (Becker, Mendez, & Rodríguez, 2001; Kalantar et al., 2012).

Sin embargo, tal y como se ha referido anteriormente, las demandas del tráfico aumentan año tras año, haciendo que, en muchos casos, y principalmente en zonas de grandes gradientes térmicos, donde la carga del tráfico ha aumentado o donde existe una tendencia al empleo de capas de menor espesor, las propiedades aportadas por este tipo de betunes ya no resulten suficientes. Esto se traduce en un mayor deterioro de las mezclas que los incorporan, una reducción de su vida útil y, con ello, una mayor frecuencia en la necesidad de tareas de mantenimiento. Por ello, y debido esta necesidad de mejora en las propiedades y la durabilidad de los materiales bituminosos empleados en las infraestructuras de transporte, surge el desarrollo conceptual y tecnológico de las mezclas bituminosas modificadas.

Para la modificación de las mezclas existen dos principales métodos, la adición de fibras o la modificación mediante el empleo de polímeros. El empleo de fibras en sus distintas tipologías (poliéster, asbestos, nylon, celulosa, geosintéticas, etc.) permite variar el comportamiento viscoelástico de la mezcla y proporciona un aumento en la resistencia a tracción de las mezclas, incrementando la cantidad de deformación que pueden absorber durante su fatiga y fisuración. Con ello, su empleo permite mejorar la resistencia de las mezclas a la acción del agua y a las deformaciones permanentes, frenar la reflexión de fisuración dentro de las mismas (Abtahi, Sheikhzadeh, & Hejazi, 2010) y, al igual que en el caso de los polímeros, disminuir el riesgo de escurrimiento del ligante (Figura 10).



Figura 10. Diferentes tipos de fibras empleados en la fabricación de mezclas bituminosas.

En relación con los polímeros, su adición es el método de modificación más extendido actualmente y, en ocasiones, su empleo va acompañado del uso de fibras. Estas mezclas que son producidas a través de la incorporación de polímeros a las mezclas tradicionales ya sea a través de la modificación del ligante empleado en las mismas o, por el contrario, añadiendo el material plástico como si de otro árido se tratase. En cualquiera de los casos, dicha modificación ha demostrado ser capaz de mejorar el comportamiento de las mezclas (resistencia a deformaciones permanentes, mejora a la fatiga, etc.) en todos los rangos de temperatura disminuyendo la susceptibilidad térmica de las mismas.

2.2 Utilización de polímeros en mezclas bituminosas

El término polímero se refiere a moléculas de gran tamaño generadas por la reacción química entre muchas moléculas de menor tamaño, denominadas monómeros, que se unen para formar una larga cadena. La secuencia en la que se dispongan los monómeros, su estructura química, el peso molecular de estos y la distribución de dicho peso, condicionaran las propiedades físicas del polímero en el que se integran (Becker et al., 2001).

Los polímeros, naturales o sintéticos, se comenzaron a emplear como modificadores del asfalto en 1843. No obstante, sería en la década de 1930 cuando se iniciaría su progreso, comenzando su uso efectivo en Europa y Norteamérica a partir de 1950 y a través del uso del caucho de látex. Desde entonces, la región europea fue por delante en el desarrollo de esta tecnología, máxime tras la limitación de este tipo de ligante en EE. UU a finales de los años 70 por su elevado coste. Sería a mediados de los 80 cuando EE. UU recuperara el empleo de nuevos polímeros y de la tecnología desarrollada en Europa (Kalantar et al., 2012). Desde entonces, el desarrollo y la mejora de materiales y procesos de modificación ha seguido progresando y numerosos estudios en todo el mundo han evaluado los beneficios de la modificación con polímeros en las propiedades de los materiales bituminosos, desarrollando nuevas especificaciones y métodos de ensayo para este tipo de mezclas y ligantes.

Existe un elevado consenso acerca de cómo la adición de ciertos polímeros en condiciones adecuadas mejora el comportamiento de la mezcla bituminosa frente a las principales causas de su deterioro relacionadas con las cargas del tráfico y las condiciones climáticas. Esto da lugar a un incremento de su vida de servicio facilitando, además, la producción de mezclas abiertas (con un elevado contenido de huecos que permiten, al mismo tiempo, mejorar el drenaje de la mezcla y conseguir una considerable reducción de ruido) (Kalantar et al., 2012; Polacco et al., 2015).



Figura 11. Planta de modificación de betunes (Hunter et al., 2015).

Existen dos métodos comunes a la hora de incorporar los polímeros a las mezclas bituminosas: bien como un árido más, lo que se conoce como modificación por vía seca (dry method en inglés), o bien como modificador del ligante previo a la adición de este a la mezcla, lo cual se

conoce como vía húmeda (wet method en inglés). En la Figura 12 se puede ver un esquema de cómo cada uno de estos métodos se aplicarían dentro del proceso de fabricación de una mezcla bituminosa en planta.

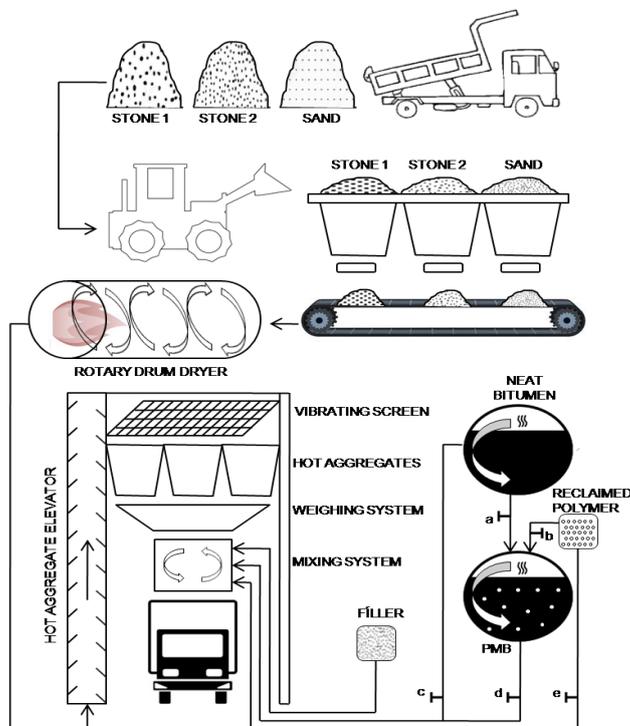


Figura 12. Esquema del proceso de modificación con polímeros por vía seca o húmeda en una planta asfáltica de tipo discontinuo (Brasileiro, Moreno-Navarro, Tauste-Martínez, Matos, & Rubio-Gómez, 2019).

En la modificación por vía húmeda, el polímero se añadiría directamente al ligante como paso previo a la mezcla con el resto de componentes (en la Figura 12, las líneas correspondientes al sistema de dosificación del polímero y los tanques de betún- “a”, “b” y “d”- manteniendo las líneas “c” y “e” cerradas). Dentro del tanque de ligante modificado, los polímeros y el betún base se someterían a un proceso de mezclado durante un tiempo determinado y a la temperatura adecuada para la interacción de los materiales de manera previa a su incorporación a la mezcla. En el caso de que el betún resultante no sea estable al almacenamiento y no sea empleado inmediatamente después de la modificación, es habitual que estos tanques cuenten con sistemas de agitación que aseguren la homogeneidad del ligante modificado.

En relación a la modificación por vía seca, esta es más sencilla desde el punto de vista de las modificaciones necesarias en la planta (Cao, 2007; Lastra-González, Calzada-Pérez, Castro-Fresno, Vega-Zamanillo, & Indacochea-Vega, 2016) siendo posible incorporar el polímero bien mezclado previamente con alguna de las fracciones de árido o directamente durante el

mezclado como una fracción de árido más (Modarres & Hamedi, 2014; Earnest, 2015) (en la Figura 12, las líneas abiertas serían las “c” y “e” y las líneas “a”, “b” y “d” permanecerían cerradas).

A pesar de que su implementación en planta es algo más problemática, el método húmedo generalmente introduce menos problemas en la mezcla resultante y proporciona mejores resultados en términos de modificación. No obstante, y como veremos más adelante, se debe poner especial atención en la elección de las condiciones de mezclado para lograr una adecuada dispersión del polímero dentro de la matriz de betún de modo que se mejoren las propiedades de este último y la mezcla de ambos permanezca estable sin que se produzca separación de fases (Polacco, Berlincioni, Biondi, Stastna, & Zanzotto, 2005; Yu, R., Fang, Liu, Liu, & Li, 2015). El método seco por su parte, normalmente requiere de unos tiempos y energía de mezclado superiores a los de una mezcla convencional para garantizar la adecuada dispersión del polímero con el resto de áridos, previo a la incorporación del ligante.

2.2.1 Ligantes modificados con polímero

Los ligantes modificados con polímeros (resultado de la modificación por vía húmeda) se definen como aquellos que mediante la adición de este material han variado sus propiedades mecánicas al alterar la estructura física y química del betún del betún original (Hunter et al., 2015). Estos deben satisfacer una serie de requerimientos (Polacco et al., 2015; Cuadri et al., 2016):

- la mejora de las propiedades mecánicas de la mezcla a la que se aplican
- una viscosidad a altas temperaturas compatible con los equipos y sistemas tradicionales de fabricación y puesta en obra de mezclas bituminosas
- un coste razonable
- garantía de permanecer estables durante su almacenamiento

Debido a estos requisitos, a pesar de la existencia de una enorme cantidad de polímeros distintos, solo algunos de ellos son realmente aplicables a nivel industrial. Estos tienen en común la habilidad de generar una red física interna dentro del betún. Dicha red se origina a través de la presencia simultánea de elementos rígidos (por debajo de la temperatura de transición cristalina (T_g)) y segmentos flexibles dentro de su estructura (Polacco et al., 2015). Si dicha red es integrada con las moléculas del betún durante el mezclado con el betún base sin perder su estructura principal, dará lugar a una significativa mejora de sus propiedades viscoelásticas (Polacco et al., 2015).

Por tanto, y para que la modificación efectiva del ligante sea posible, es necesario un proceso de mezclado con altas temperaturas (entre 160 y 180°C) y agitación que permita la integración del polímero con las moléculas de betún formando una red polimérica imbuida en el ligante. Esta dará lugar a una significativa mejora de sus propiedades viscoelásticas con respecto de aquellas que presentaba el betún base (Polacco et al., 2015). Gracias a este proceso, los componentes más compatibles del betún migran hacia la fase rica en polímeros, quedando imbuidos en la matriz del mismo y reduciendo ligeramente el dominio cristalino sin que ello conlleve una pérdida de las propiedades originales del polímero que, de este modo, son heredadas por el ligante resultante.

Lograr esto dependerá de la interacción entre los distintos componentes del betún y el polímero la cual, a su vez, se verá influida por la afinidad química entre el polímero y las moléculas de betún de distinta polaridad agrupadas según las categorías SARA (Figura 2). Cada uno de estos grupos interacciona de manera distinta con el polímero el cual absorbe de manera selectiva las moléculas de betún más afines y se ve sometido a una destilación interna que da lugar a la formación de una fase rica en polímeros (FRP) y una fase asfáltica residual (FRA) formada por los componentes más difíciles de absorber por parte del polímero (Polacco et al., 2015). En función de la capacidad del polímero de absorber elementos del betún y de las condiciones de mezclado (tiempo, temperatura, método y velocidad de agitación, etc.) se pueden obtener distintas morfologías internas que condicionaran las propiedades obtenidas.

Fruto de la interacción entre las dos fases formadas dentro del betún, se pueden establecer distintas etapas en el proceso de modificación en función del grado de absorción de componentes del betún llevada a cabo por el polímero. Esto condicionará la morfología interna obtenida que influirá, a su vez, en las propiedades mecánicas del ligante. Así, en la Figura 13 se pueden diferenciar distintas zonas a medida que se incrementa el grado de absorción, y un esquema de la estructura interna del sistema en cada una de ellas:

- Para grados de absorción bajos (Zona 1), la fase rica en polímero permanece dispersa en la fase rica en asfaltenos. De este modo, el polímero no modifica de manera significativa el comportamiento del ligante que será similar al del betún base.
- A medida que el grado de absorción aumenta, se llega al punto en el que se produce la inversión de fases (Zona 2). A partir de dicho punto la fase rica en polímeros (FRP) comienza a mostrar una estructura ordenada y el cambio de las propiedades mecánicas del ligante se incrementa considerablemente.

- Tras esta zona, se alcanza la mayor tasa de cambio en las propiedades mecánicas del ligante (Zona 3). Sin embargo, en esta zona el betún resultante tiende a ser inestable al almacenamiento.
- Se debe llegar a un grado de interacción entre el polímero y el betún en el cual, si bien no se alcanza el mayor grado de cambio en el comportamiento mecánico, este sigue siendo considerablemente más óptimo que el del betún base y, lo que es más importante, el ligante resultante es estable (Zona 4).
- Más allá de este punto, la modificación conducirá a la consecución de un sistema totalmente homogéneo en el que la influencia del polímero vuelve a ser despreciable (Zona 5).

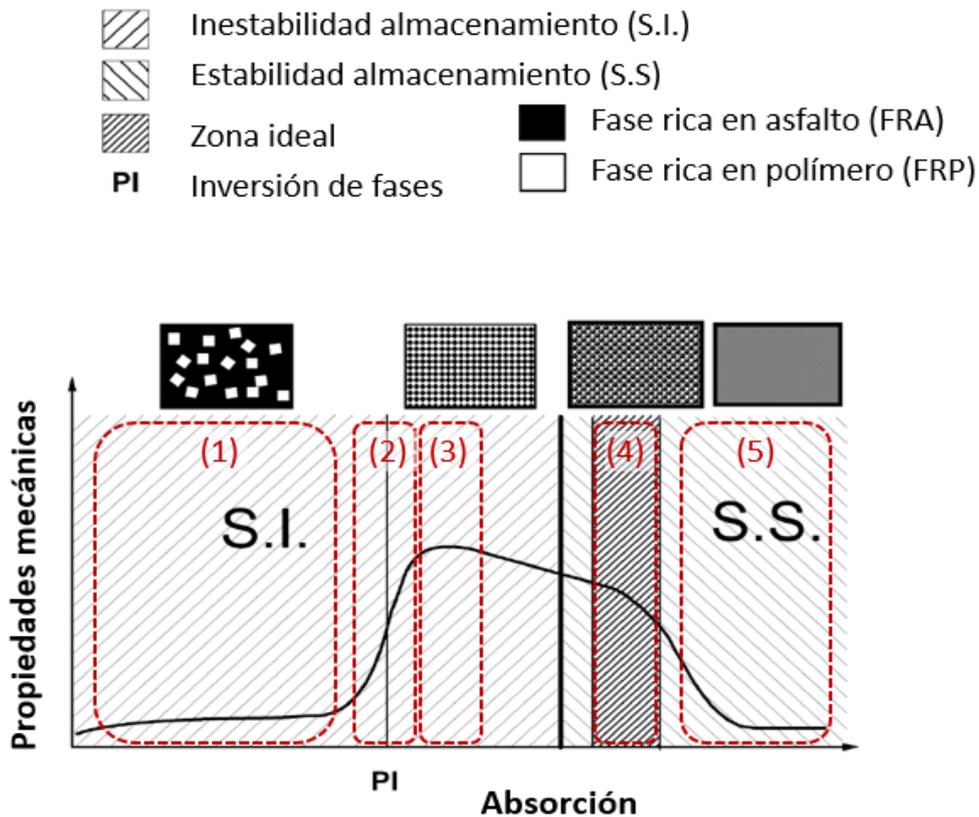


Figura 13. Evolución de las propiedades mecánicas del betún modificado según la interacción entre las fases de asfaltenos y de polímeros (Elaboración a partir de (Polacco et al., 2015)).

Más allá del modo en el que se relacionen betún y polímero, existen dos principales enfoques a la hora de mejorar las propiedades del betún, estando ambos relacionados con la modificación de la forma en la que este responde a la deformación o, dicho de otro modo, con la alteración

de su flujo viscoso (responsable de las deformaciones permanentes) el cual incrementa con el tiempo de carga y la temperatura (Hunter et al., 2015):

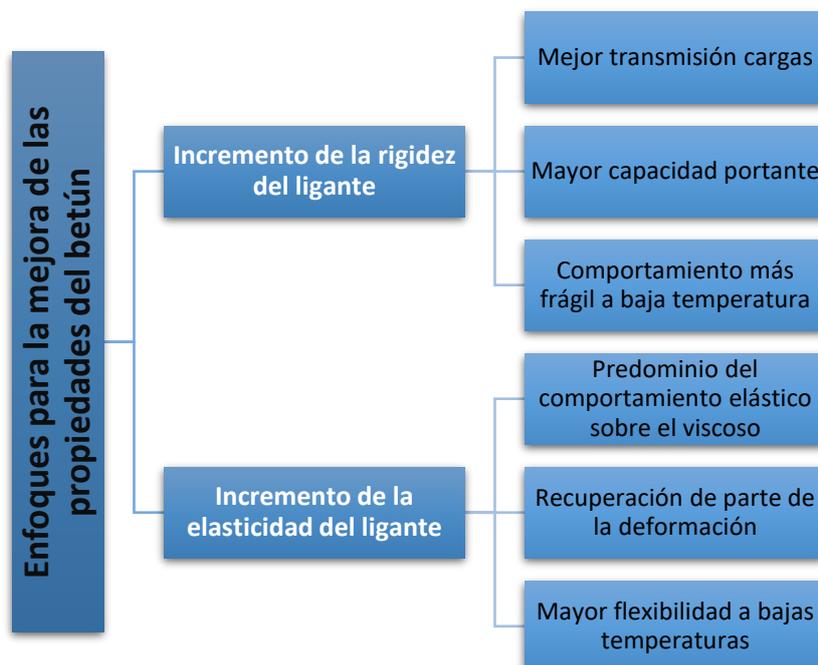


Figura 14. Esquema de la forma en la que los polímeros pueden mejorar las propiedades del betón (Elaboración propia).

Considerando que estos efectos se pueden conseguir también a través de la combinación de polímeros de distinta naturaleza, surge la posibilidad de combinar empleo de polímeros como los elastómeros o el caucho que incrementan la flexibilidad a bajas temperaturas con otro tipo de polímero más centrado en el aumento de la rigidez como los plastómeros. Estos son capaces de cristalizar creando una red tipo gel a altas temperaturas, mejorando así la resistencia a las deformaciones.

2.2.2. Factores que influyen en las propiedades de los ligantes modificados con polímeros

Independientemente del enfoque empleado en la modificación (aumento de rigidez o de flexibilidad), a la hora de analizar el proceso, existe una gran variedad de factores a considerar. Estos condicionan la evolución de la interacción entre polímero y betón (Figura 13) y, con ello, las propiedades finales del betón modificado obtenido. En este apartado se realiza una revisión de dichos factores.

2.2.2.1 Tipologías de polímeros empleados en mezclas bituminosas

Quizás el factor más evidente que condiciona el comportamiento de los ligantes modificados es el tipo de polímero empleado en la modificación. Por un lado, la naturaleza del polímero condiciona la proporción en que este absorbe parte de los componentes del betún o es soluble en el mismo. El polímero debe tener la capacidad de absorción suficiente que permita garantizar la inversión de fases pero que, a su vez, garantice que la estructura original del polímero permanezca y mantenga la mayor parte de las propiedades que aportaba el polímero virgen antes de su interacción con el betún. Por otra parte, las características propias de cada polímero darán lugar a una modificación más enfocada en el aumento de la rigidez o en el de la elasticidad (Figura 14).

Existe un elevado número de polímeros que pueden ser empleados en mezclas bituminosas ya sea como un árido más (vía seca) o como modificador del betún (vía húmeda). Las distintas tipologías se pueden clasificar por lo general en cinco categorías (Becker et al., 2001) las cuales aparecen resaltadas en la Figura 15:

Termoplásticos (plastómeros)

- **Poliolefinas: Polietileno (PE)**- Lineal de baja densidad (LLDPE), de baja densidad (LDPE) y de alta densidad (HDPE) o **Polipropileno (PP)** – atáctico (aPP) o isotáctico (iPP).
- **Cloruro de polivinilo (PVC)**
- **Etilvinilacetato (EVA)** y etilmetracrilato (EMA)

Elastómeros termoplásticos

- **Estireno-butadieno-estireno (SBS)**
- Estireno-isopreno copolímero en bloque (SIS)
- Etileno-propileno-dieno (EPDM)

Cauchos naturales y sintéticos

- Caucho natural
- Polidiolefinas: polibutadieno y polisopreno
- **Caucho procedente de neumático al final de su vida útil (PNFVU)**

Termoestables

- Resinas de tipo epoxi

Combinación de polímeros

Figura 15. Clasificación de los distintos polímeros empleados en la modificación de materiales bituminosos (Elaboración propia).

De entre las tipologías usadas, aproximadamente el 75% son elastómeros, el 15% termoplásticos y el 10% restante corresponde al caucho o combinaciones de polímeros, siendo el empleo de los

polímeros termoestables mucho más específico (Airey, 2003a; Polacco et al., 2015). Aunque las distintas tipologías tienen efectos comunes cuando se aplican, como la reducción de la susceptibilidad térmica de los materiales bituminosos, cada categoría tiene efectos específicos en las propiedades mecánicas de estos. Así, atendiendo a los efectos de la modificación (Figura 14) y en términos generales, los polímeros termoplásticos actúan principalmente sobre la rigidez y resistencia a deformaciones permanentes de los materiales bituminosos, mientras que elastómeros y cauchos se centran más en mejorar la recuperación elástica de los mismos. Los polímeros termoestables como las resinas epoxis, por su parte, suelen tener un ámbito de aplicación mucho más reducido y específico.

Polímeros termoplásticos (plastómeros)

Los polímeros termoplásticos se caracterizan por reblandecerse al calentarse y volver a recuperar su dureza cuando se enfrían. Su versatilidad hace que estos polímeros estén presentes en una gran variedad de aplicaciones permitiendo que polímeros como el polietileno (PE) sean abundantes también como residuo. Esto facilita una opción adicional de empleo a través de su reciclaje como veremos más adelante. Entre los polímeros termoplásticos (también comúnmente denominados en este ámbito, plastómeros) empleados en mezclas bituminosas, encontramos distintas tipologías tal y como se ve en la Figura 16.

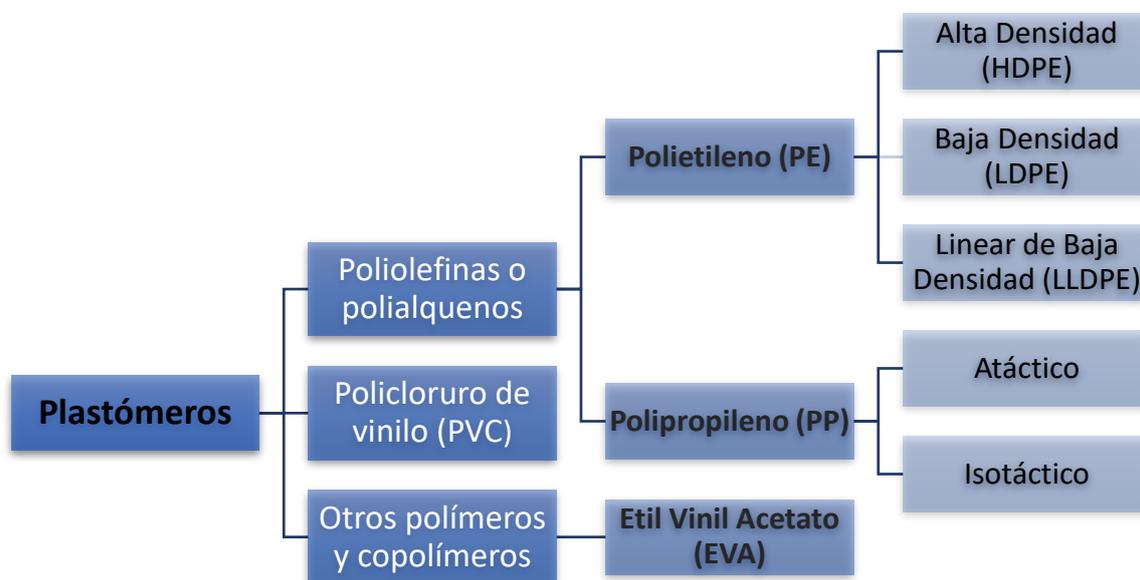


Figura 16. Clasificación de los plastómeros de mayor empleo en la modificación de ligantes (Elaboración propia).

Dentro de los distintos tipos, las poliolefinas son los más extendidos debido a sus beneficios y a su relativo bajo coste (entre 470 y 570 euros por tonelada según tipología) (Polacco et al., 2015;

Verhoeven & Juffernbruch, 2019). Mediante su adición es habitual la formación de estructuras bifásicas en las que las poliolefinas quedan dispersas dentro de la matriz del betún absorbiendo los componentes más ligeros de este (Hunter et al., 2015)). A medida que el contacto entre ambas fases está más entrelazado, mayores son los cambios en el rango de plasticidad, propiedades mecánicas, susceptibilidad térmica y elasticidad del ligante resultante. De este modo, la modificación que emplea estos materiales constituye un proceso más físico que uno que implique la generación de nuevos grupos químicos funcionales (Brasileiro et al., 2019).

Independientemente de las distintas tipologías incluidas en este grupo, estos polímeros tienen una naturaleza en la que predomina el comportamiento plástico frente al elástico. Por este motivo, la principal aportación de los mismos a los materiales bituminosos será el incremento de su rigidez y la mejora de su resistencia a las deformaciones plásticas inducidas por el tráfico en lugar de la mejora de la elasticidad.

Desde el punto de vista de la modificación, la estructura de estos polímeros favorece la formación de redes poliméricas lo que contribuiría a una mayor estabilidad, sin embargo, su mayor cristalinidad reduce la capacidad de absorber componentes del betún si los comparamos con otros polímeros como los de tipo SBS. Por este motivo, requieren de un cuidado estudio de cantidades y condiciones de mezclado para asegurar su estabilidad al almacenamiento (Polacco et al., 2015).

Elastómeros termoplásticos

Son los polímeros más empleados actualmente en la modificación de materiales bituminosos. Dentro de estos, el más extendido de manera comercial para la obtención de betunes modificados en refinería, es el estireno-butadieno-estireno (SBS, según sus siglas en inglés, Figura 17). Este elastómero y otros similares como el co-polímero en bloque de tipo estireno-isopreno (SIS, según sus siglas en inglés) permiten mejorar el flujo y la resistencia a deformación del ligante a altas temperaturas sin comprometer la flexibilidad a las más bajas. Esto sumado a la elasticidad aportada, buena estabilidad y la mejora de la adhesividad con los áridos hacen que sea un material muy interesante de cara a la obtención de ligantes modificados.



Figura 17. Polímero elastómero del tipo estireno-butadieno-estireno (SBS).

Sin embargo, este tipo de polímeros también presentan algunos inconvenientes, siendo el principal de ellos su elevado coste. Pese a ser empleado en porcentajes en torno al 2-4% (Becker et al., 2001) es capaz de aumentar alrededor del 30-38% el precio del ligante sin modificar ((Moreno-Navarro, F. et al., 2017). Dicho aumento puede ser aún mayor en betunes altamente modificados para aplicaciones concretas donde el porcentaje de adición se incrementa hasta contenidos cercanos al 6% sobre peso de ligante. Este aumento de precio termina por limitar su aplicabilidad al aumentar el coste final de las mezclas a las que se incorpora.

A esto se suma una resistencia a la penetración algo inferior que otros polímeros a altas temperaturas, una viscosidad más elevada a la temperatura de puesta en obra (que hace la mezcla algo menos trabajable) y, lo que es más importante, una resistencia a la oxidación menor (debido a la presencia de enlaces dobles en su cadena principal) que la obtenida mediante el empleo de plastómeros de tipo poleolefínicos como el polietileno (Becker et al., 2001; Kalantar et al., 2012). Pese a ello, su mayor estabilidad y la posibilidad de incrementar la elasticidad del ligante hace que su uso esté más extendido que el de los plastómeros al no considerar la evolución a largo plazo de sus propiedades y resolver el problema de su coste adicional limitando su aplicabilidad a actuaciones muy concretas (altos volúmenes de tráfico y elevados gradientes térmicos).

Caucho

En relación al caucho, este es probablemente uno de los polímeros más empleados en la actualidad y un gran ejemplo de la viabilidad del empleo de materiales reciclados ya que, en su mayor parte, el caucho utilizado en modificación de materiales bituminosos procede del reciclaje de neumáticos y no de la materia prima original (Figura 18). Se estima que solo en España hay ya más de 1.100 km de vías en las que se han empleado este material a través del empleo de polvo de neumático reciclado (Bermejo-Muñoz, Gallego-Medina, & Saiz-Rodríguez,

2014) con un desempeño muy bueno en términos de resistencia a fatiga, deformaciones permanentes y reducción de ruido.



Figura 18. Caucho natural a partir del látex procedente la salvia de árboles tropicales.

La interacción entre este material y el betún se plantea, por un lado, como una reacción química que consiste a su vez en la degradación de las cadenas de elastómero por acción de la temperatura, y un proceso de devulcanización del caucho. No obstante, y, por otro lado, la interacción de ambos materiales es principalmente física y consistente en el hinchamiento del caucho al absorber las fracciones más ligeras del betún.

En relación al empleo de este material, ya en 2007 el Ministerio de Medio Ambiente y Fomento en colaboración con el CEDEX redactaron un manual de empleo del mismo en el que se definían los tres tipos de ligantes modificados con caucho (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, (CEDEX), 2007). En orden de mayor a menor grado de modificación se definen:

- Betunes mejorados con caucho: con hasta el 10% de caucho y propiedades mejoradas respecto a los betunes convencionales de penetración similar.
- Betunes modificados con caucho: combinaciones de caucho entre un 4 y 5% con otros polímeros como los de tipo SBS.
- Betunes modificados de alta viscosidad (con un contenido de polímero generalmente mucho más alto).

Polímeros termoestables

Los polímeros termoestables como las resinas epoxis por su parte, suelen tener un ámbito de aplicación mucho más reducido y específico que el resto de polímeros. Entre estos se encuentran algunas pistas de aeropuertos y puentes. Dichos polímeros son muy resistentes a ataques químicos, tienen una elevada resistencia a la fisuración, elasticidad y adhesividad, pero su

empleo, más parecido al de una resina estructural que al de una mezcla bituminosa, está muy limitado por su elevado coste (Becker et al., 2001).



Figura 19. Ejemplo de pavimento con betún modificado con resina epoxi empleado en el puente San Francisco-Oakland SAS Bay. (Fuente: ChemCoSystems)

2.2.2.2 Contenidos de polímero a emplear en la modificación

Más allá de la naturaleza de los polímeros seleccionados, el contenido a añadir también influye significativamente en el resultado obtenido. El contenido óptimo variará de una tipología de polímero a otra y se verá influido por el betún base empleado. No obstante, en términos generales, existirá un umbral por debajo del cual la adición de polímeros, hace posible incrementar la temperatura en la que la mezcla alcanza su flujo viscoso. Por otro lado, para contenidos por encima del mismo, en los que las partículas cristalinas son suficientes para determinar la inversión de fases, la mezcla adquiere un carácter de gel que hace que esta solo fluya cuando dichas partículas se funden (Polacco et al., 2015). Así, desde el punto de vista de la proporción entre betún y polímero se pueden establecer de manera general tres escenarios (Brûlé, Brion, & Tanguy, 1988; Becker et al., 2001):



Figura 20. Escenarios posibles desde el punto de vista de la proporción entre betún y contenido de polímero.

2.2.2.3 Influencia del betún base

De la misma forma que el polímero debía mantener parte de sus propiedades originales tras la modificación, la composición del betún base debe ser capaz de sobrevivir a la alteración de su estado coloidal inducida por el polímero (Polacco et al., 2015). Si este último tiene tendencia a absorber maltenos (algo común en los polímeros tipo SBS) se producirá una reducción en el número de moléculas peptizantes disponible para cubrir las micelas de asfaltenos. Cuando esto se produce, los asfaltenos tienden a asociarse entre sí dando lugar a una mayor posibilidad de segregación por el mayor peso molecular resultante.

Si, por el contrario, el betún base posee un contenido bajo de asfaltenos y elevado de aromáticos, tras la absorción de estos por el polímero, las resinas aún serán capaces de peptizar los asfaltenos reduciendo el riesgo de segregación y separación de la red polimérica generada.

Por este motivo, en ocasiones, se ha propuesto el empleo del índice coloidal (IC) como un indicador de si un betún es más o menos adecuado para su modificación. No obstante, este parámetro, aunque útil, no debe ser usado como regla general ya que, en su definición, aromáticos y saturados actúan de manera opuesta mientras que, en el caso de la modificación, los saturados también contribuirían a incrementar la estabilidad del sistema (Polacco et al., 2015).

$$IC = \frac{\text{Asphaltenes} + \text{Saturates}}{\text{Aromatics} + \text{Resins}}$$

De este modo y, en términos generales, existe bastante consenso acerca de los requisitos de un betún para que el proceso de modificación sea exitoso ((Becker et al., 2001; Kalantar et al., 2012):

- El betún debe poseer una cantidad suficiente de fracciones oleicas y un contenido alto de componentes condensados como hidrocarburos aromáticos. Estos compuestos interactúan bien con los aromáticos polares presentes en los polímeros permitiendo la absorción de parte de las fracciones del betún.
- La cantidad de asfaltenos no puede ser demasiado elevada ya que esto daría lugar a la precipitación por condensación de estos y, con ello, a una separación de fases.
- El contenido de asfaltenos no puede ser muy bajo ya que esto daría lugar a un sistema de fase única.

Además de la influencia de la composición química, otros factores como la viscosidad del betún base también condicionarán el mezclado. Una viscosidad baja (a temperaturas lo bastante altas para integrar el polímero, pero no tan elevadas para dar lugar a procesos de oxidación) permitirá, por un lado, una primera dispersión del polímero de manera más sencilla y, después, una mayor velocidad de penetración del betún en el polímero de manera que la integración de ambos se acelera (Hunter et al., 2015).

Más allá de estas consideraciones generales, cada tipo de polímero tendrá unas características para las cuales será más o menos adecuada una determinada composición del betún base. De esta forma, encontramos desde sistemas donde el betún base tiene una gran aromaticidad y el polímero permite su completa disolución, a sistemas en los que polímeros como los de tipo termoplástico generan, en la mayoría de ocasiones, una modificación más de tipo físico que derivada de interacciones químicas, dando lugar a un sistema de dos fases.

2.2.2.3 Condiciones de mezclado

En relación al proceso de mezclado, las variables básicas que influyen en la obtención del ligante modificado son el tiempo y la temperatura fijados para la interacción entre el betún y el polímero, así como la energía empleada en el mismo, la cual vendrá condicionada por el equipo empleado.

Existe una estrecha relación entre la temperatura fijada para la modificación y el tiempo necesario para esta. Así un periodo de mezclado corto (o alternativamente una temperatura de modificación baja) dará lugar a un grado de absorción bajo (Figura 21). Este irá aumentando de manera progresiva a medida que el tiempo y/o la temperatura de mezclado se incrementan pudiendo conducir en última instancia a la completa disolución del polímero (Polacco et al., 2015).

El tiempo y temperatura necesarios dependerán en buena medida de las características del polímero ya que aquellos con un peso molecular más alto necesitarán, por lo general, periodos de mezclado más prolongados o temperaturas más altas. No obstante, otros factores como la viscosidad del betún base o la reducción en el tamaño de las partículas poliméricas a incorporar pueden favorecer que el proceso de modificación se acelere (Hunter et al., 2015).

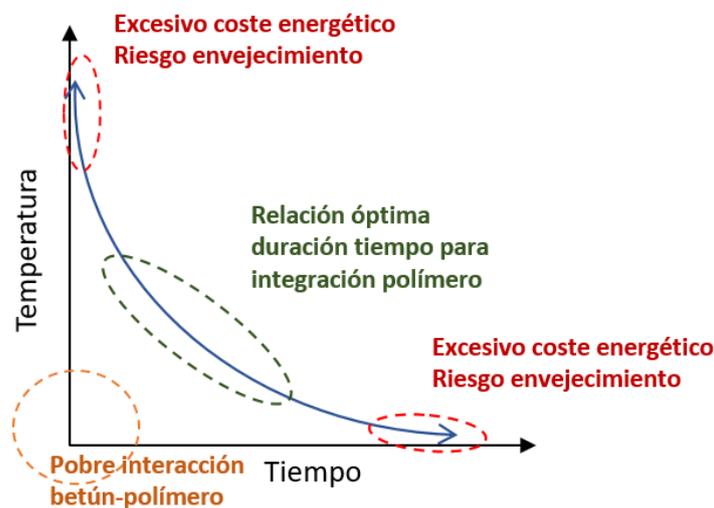


Figura 21. Relación entre tiempo y temperatura para la modificación de ligantes (Elaboración propia).

Aparte de la necesidad de buscar la temperatura y duración óptimas para el mezclado, atendiendo al criterio de modificación de propiedades y estabilidad previamente mencionado, estos factores deben mantenerse en el menor rango posible. Esto se debe, por un lado, a motivos económicos y, por otro, al hecho de que elevadas temperaturas y tiempos de

calentamiento hacen que el betún y el polímero sean más susceptibles a degradarse por la acción del envejecimiento asociado a la oxidación de los materiales.

Finalmente, y en relación al equipo empleado para llevar a cabo la modificación, existen dos métodos de mezclado principales. El primero de ellos se corresponde con un mezclado a baja velocidad para el cual se emplea un tanque y un agitador de espas (Figura 22 a). Para este método se selecciona una temperatura fija de mezclado y el tiempo de mezclado vendrá determinado por la disolución del polímero en el betún y la digestión del mismo. Este es un método adecuado cuando las partículas del polímero a añadir son de tamaño reducido. Por otra parte, el mezclado por cizalla a alta velocidad (Figura 22 b) no mantiene una temperatura fija, sino que esta se va aumentando para reducir de manera paulatina el tamaño de las partículas de polímero hasta lograr su completa integración ayudada por el flujo de alta velocidad aplicado a la mezcla (Kalantar et al., 2012).

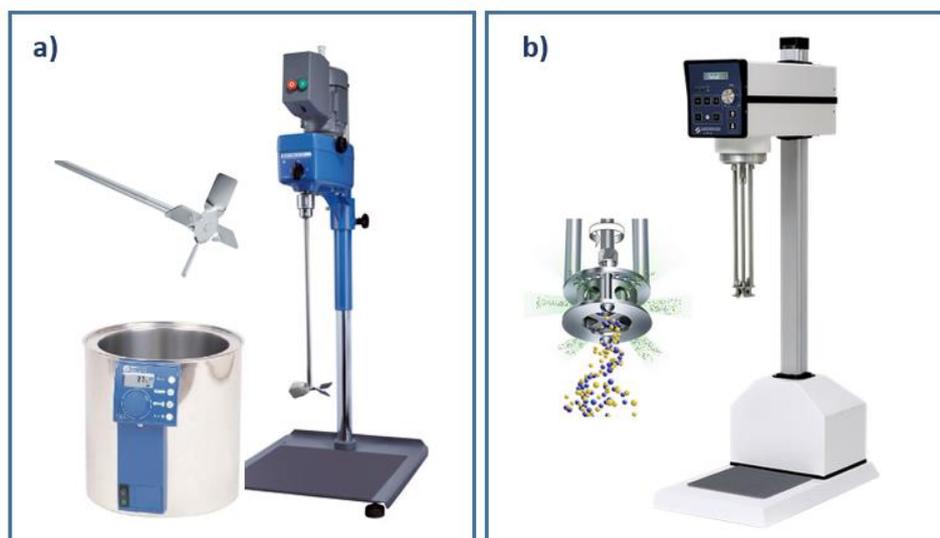


Figura 22. Equipos empleados en la modificación de betunes con polímeros: a) Equipo para mezclado a baja velocidad; b) Equipo para mezclado a cizalla de alta velocidad.

2.3 Reutilización de polímeros reciclados en mezclas bituminosas.

2.3.1 Motivación del empleo de polímeros reciclados

Pese a las ventajas obtenidas de su empleo, el uso de polímeros encarece significativamente el coste total de la mezcla al introducir un elemento adicional dentro del ligante. Dicho aumento es especialmente reseñable en el caso de los betunes modificados comerciales que a menudo incorporan polímeros del tipo SBS (estireno-butadieno-estireno) o SIS (estireno-isopreno-

estireno) los cuales, debido a su compleja manufacturación mediante polimerización aniónica a baja temperatura, tienen un precio elevado. Esto trae consigo aumentos de los costes relativos al material de la mezcla entre un 30 y un 40% con respecto a una mezcla convencional, pudiendo llegar a ser la inversión necesaria para estas mezclas hasta 1.5 veces mayor si consideramos el aumento de los costes de producción (Polacco et al., 2015; Moreno-Navarro, F. et al., 2017).

Al mayor coste derivado del empleo de los polímeros hay que sumar la falta de consideración económica de las ventajas estructurales obtenidas mediante el uso de este tipo de materiales. Los métodos de diseño favorecen, por lo general, las mezclas tradicionales que no incorporan polímeros en su formulación. Esto es debido a que dichos métodos, generalmente de tipo mecánico-empírico, tiene carencias a la hora de representar las tensiones y deformaciones producidas en la realidad.

Además, estos modelos suelen estar basado en modelos mecánicos lineales que no siempre representan el carácter no lineal de las mezclas bituminosas. La falta de herramientas dentro de estos métodos para considerar el inicio y la propagación del daño conducen a que, en muchas ocasiones, se dé prioridad a mezclas de mayor módulo de rigidez, pero peor desempeño. Debido a ello, se limita la reducción de espesores de capa propiciada por el empleo de polímeros al no considerar su mayor durabilidad (a través por ejemplo de su recuperación elástica o resistencia a fatiga), que reduciría el coste global de este tipo de soluciones.

En este sentido, Moreno-Navarro, F. et al. (2017) en su estudio llegaron a demostrar cómo el empleo de mezclas que normalmente incorporan polímeros en su composición, como las de tipo BBTM, podían llegar a reducir el coste hasta 4 veces cuando se comparaba con una mezcla convencional tipo AC 16 fabricada con betunes convencionales, si se consideraba la necesidad de mantenimiento de ambas mezclas para una misma vida útil.

No obstante, a la hora de realizar una inversión, aún existe una excesiva tendencia a considerar únicamente la parte inicial de la misma sin tener en cuenta cómo la adición del polímero puede reducir el coste global siempre que el ahorro en posteriores actuaciones de mantenimiento supere el sobre coste inicial. Esto limita significativamente la aplicabilidad de este tipo de mezclas, cuyo empleo queda por regla general relegado a vías de alta capacidad y capas de rodadura. Por ello, la búsqueda de soluciones que consigan abaratar dicha inversión inicial y demostrar la consecución de mejores prestaciones y mayor durabilidad sigue siendo el camino a recorrer para extender la aplicabilidad de este tipo de materiales.

Por otra parte, más allá del problema económico, existen una vertiente medioambiental que también favorece el empleo de polímeros en las mezclas bituminosas. El reciclaje y reutilización de materiales al final de su vida útil es una práctica cada vez más extendida y presente en diversos procesos productivos. Mediante ella es posible dotar de una nueva función a materiales que, de otro modo, constituirían un residuo cuya eliminación es, no solo costosa, sino medioambientalmente insostenible.

En la actualidad, y siendo conscientes de la importancia de esta problemática, el sector de la construcción ha profundizado en la investigación acerca de cómo distintos residuos pueden ser incorporados a las infraestructuras de transporte. Teniendo en cuenta que dichas infraestructuras requieren durante su construcción grandes cantidades de material, la incorporación incluso en pequeños porcentajes de algún tipo de material reciclado supone, en su conjunto, una importante cantidad de material que recibe un nuevo empleo. De este modo, se reduce significativamente su impacto ambiental a la vez que mejora las prestaciones de la infraestructura a la que se incorpora.



Figura 23. Ejemplo de la obtención de materiales para su empleo en mezclas bituminosas.

Dentro del sector de los pavimentos bituminosos se han empleado diversos materiales en los distintos componentes de la mezcla, ya sea como sustitutos de los áridos (Zaumanis, Mallick, & Frank, 2014; Sutradhar, Miah, Chowdhury, & Sobhan, 2015) , empleando fílleres que mejoren las propiedades de la misma (Androjić & Kaluđer, 2017) o como modificadores del ligante que los une (Polacco et al., 2005; Casey, McNally, Gibney, & Gilchrist, 2008).

Entre los residuos que se refieren a la sustitución de áridos, quizás el más importante es el residuo generado tras el fresado de mezclas bituminosas dañadas. Este material es conocido en el ámbito internacional como RAP (Reclaimed Asphalt Pavement). Sólo en Europa en 2017 se generaron alrededor de 48 millones de toneladas este residuo, siendo esta cifra próxima al medio millón de toneladas en el caso de España (European Asphalt Pavement Association, 2017).

Esto tiene un importante impacto en los costes económicos y ambientales derivado de la necesidad de acumular estos residuos en vertederos. Por ello, resulta necesario buscar una solución que evite dicha situación y que, además, proporcione un valor añadido al material, por ejemplo, mediante su reutilización en la construcción de nuevas mezclas. Por este motivo, en los últimos años existe una creciente tendencia hacia aumentar el porcentaje que este material supone dentro del total de áridos de las nuevas mezclas, haciendo un esfuerzo por superar los inconvenientes que limitan su empleo (Tauste, Moreno-Navarro, Sol-Sánchez, & Rubio-Gámez, 2018a).



Figura 24. Fresado de carreteras y material fresado obtenido.

Junto con estos, los residuos procedentes de otros procesos constructivos como los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) (Pérez, Toledano, Gallego, & Taibo, 2007; Sutradhar et al., 2015) o los procedentes de otras industrias como las escorias negras de acería o las escorias de centrales térmicas (Muniandy & Aburkaba, 2011; Topini, Toraldo, Andena, & Mariani, 2018; Movilla-Quesada, Muñoz, Raposeiras, & Castro-Fresno, 2018) son también otros áridos con un gran potencial de reciclaje.

Dentro del ámbito del filleres reciclados, existe también una elevada cantidad de materiales, con mayor menor disponibilidad, cuyo empleo se ha estudiado dentro de las mezclas bituminosas (Xue, Hou, Zhu, & Zha, 2009; Sargin, Saltan, Morova, Serin, & Terzi, 2013; Modarres, Rahmazadeh, & Ayar, 2015; Mohajerani et al., 2017; Androjić & Kaluđer, 2017). En la siguiente tabla, se pueden encontrar ejemplos de distintos tipos de filleres reciclados, su disponibilidad, tamaño, composición química y algunos de sus efectos en la mezcla:

Tabla 1. Comparativa entre distintos tipos de filleres procedentes de materiales reciclados (Elaboración propia).

Fíller	Disponibilidad	% Pasa 0.063 mm	Densidad (Kg/m ³)	Comportamiento mecánico	Referencias
Polvo de cristal	ALTA	95	2.47-2.80	-39% Deformación; -10% densidad que cal y cemento. +21% Estabilidad Marshall; +15% ITS a 25°C, +63% módulo rigidez a 25°C, +2.1 veces a 40°C comparado con caliza	(Mohajerani et al., 2017; Simone et al., 2019)
Residuo de industria del cemento	MEDIA	78-81	2.70-2.75	+28.7% Estabilidad Marshall y +158.5% resistencia ITS a 25°C que la caliza	(Ahmed, Othman, & Mahmoud, 2006; Ramadan & Ashteyat, 2009)
Polvo de hormigón	MEDIA-ALTA	87	2.43-2.64	+13.3% Estabilidad Marshall, módulo similar, +4.8% ITSR, mejora en la vida de fatiga comparado con caliza	(Chen, Meizhu, Lin, & Wu, 2011)
Polvo de ladrillo	MEDIA-ALTA	90	2.34-2.72	+ (12-15)% Estabilidad Marshall, +39% Módulo de rigidez a 25°C, +1.6 veces a 40°C y +10% ITSR comparado con caliza	(Chen, Mei-zhu, Lin, Wu, & Liu, 2011; Wu, Shaopeng, Zhu, Zhong, & Wang, 2011)
Residuo de tipo cerámico	BAJA	98.7-100	2.39-2.44	+14.3 Estabilidad Marshall que la cal	(Muniandy & Aburkaba, 2011)
Escoria de acero de horno de arco eléctrico (EAF)	MEDIA	99-100	3.40-3.80	+5%, +15% and +25% de resistencia ITS a 5°, 25° y 40°C respectivamente que filler calcáreo para relaciones F/B=2	(Muniandy & Aburkaba, 2011; Topini et al., 2018; Yildirim & Prezzi, 2011)
Cenizas volantes de incinerador de residuos sólidos urbanos (MSWI)	MEDIA	90	2.18	8–16% sustitución de áridos calizos cumplen los requerimientos para mezclas SMA	(Xue et al., 2009; Topini et al., 2018)
Cenizas volante de central térmica (Clase F)	MEDIA-ALTA	90	2.10-2.32	+11% Estabilidad Marshall, +11% resistencia ITS a 25° +36.7% vida fatiga que filler calizo	(Modarres et al., 2015; Tapkın, 2008b)
Cenizas volante de central térmica (Clase c)	MEDIA-ALTA	95	2.53-2.63	Similar estabilidad Marshall y resistencia ITS que el filler calizo, +21.4 % vida de fatiga	(Tapkın, 2008b)
Ceniza de cáscara de arroz (RHA)	MEDIA	89.7	2.56-2.67	-(11-30)% Estabilidad Marshall que la caliza, rigidez similar a 25°C, -8% a 40°C	(Sargin et al., 2013)

Por otra parte, en lo referente al ligante, existe un gran número de experiencias en las que, mediante la incorporación de aditivos o materiales de origen reciclado, se consigue modificar las propiedades originales de este. En relación a los materiales empleados y teniendo en cuenta las ventajas que suponen la utilización de polímeros, el empleo de plásticos de origen reciclados surge como un residuo de gran interés.

A esto se suma la posibilidad de dar respuesta a una problemática creciente en la sociedad actual como es el consumo y eliminación de materiales plásticos. Actualmente la dependencia con respecto a este tipo de materiales se ha incrementado considerablemente. La producción de estos se situó en 64.4 millones de toneladas en Europa en 2017 (un 7.3% más que el año

anterior) y 348 millones de toneladas a nivel mundial (un 3.7% más que en 2016) (Plastics Europe. Association of Plastics Manufactures, 2018) lo que hace que su disponibilidad como residuo sea muy elevada.

Esto se refuerza si consideramos que pese a la tendencia alcista de reciclaje de este material - desde 2006 el porcentaje de plásticos que acaba en vertedero se ha reducido en un 43% -, solo un porcentaje de los plásticos recolectados (en torno a 7.4 millones de toneladas solo en Europa en 2017 (Plastics Europe. Association of Plastics Manufactures, 2018) son efectivamente reutilizados. Esto se debe a que muchos de estos plásticos cuentan con algún impedimento que hace imposible técnicamente o poco rentable desde el punto de vista económico su reutilización. La posibilidad de incorporar estos residuos, de manera aislada o junto con alguno de los polímeros que actualmente se reciclan como parte de las mezclas bituminosas, abre una nueva vía para extender la aplicabilidad de los mismos a un nuevo sector, evitando que acaben en vertederos y cumpliendo con el compromiso de buscar soluciones más sostenibles dentro del ámbito de la construcción.



Figura 25. Planta de reciclaje de plásticos.

La mayoría de estos polímeros presenta además un punto de fusión por debajo de las temperaturas de fabricación y puesta en obra de mezclas bituminosas (entre 150 y 180°C). Esto hace técnicamente factible su incorporación a estas al permitir una adecuada interacción física y química entre los distintos componentes (Nuñez, Domingos, & Faxina, 2014; Yan, Xu, & You, 2015; Wong et al., 2017).

Dada su elevada disponibilidad, queda de manifiesto que la utilización de polímeros reciclados puede servir como alternativa para la modificación de materiales bituminosos ya que, además

de conllevar ventajas de tipo ambiental, su empleo permite reducir el coste de la mezcla a la que se aplican (su coste es considerablemente menor que el de los polímeros vírgenes) sin tener que renunciar a las ventajas de carácter mecánico derivadas del uso de polímeros como los comerciales.

No obstante, la viabilidad del empleo de estos materiales dependerá en gran medida de la capacidad del grado de mejora de las prestaciones mecánicas aportadas, así como de mantener sus propiedades a largo plazo. Asociado a esto último se plantean dos problemáticas, la primera de ellas es la necesidad de obtener ligantes que sean estables durante el almacenamiento (si el polímero es aplicado por vía húmeda). La segunda por su parte, está asociada al envejecimiento de los ligantes ya que, durante el proceso de modificación las elevadas temperaturas y el consumo de fracciones volátiles y de fase maltena del betún puede dar lugar a una aceleración de este tipo de fenómeno. De esta forma, los polímeros empleados deberán garantizar un adecuado grado de desempeño a largo plazo a través de la evaluación de su envejecimiento.

2.3.2 Problemática de la estabilidad al almacenamiento

La existencia de separación entre el polímero y el betún durante el almacenamiento prolongado (la normativa actual de betunes exige resistir más de 72 horas) a altas temperaturas (generalmente superiores a los 155-160 °C) y en ausencia de agitación como el que se puede producir en las plantas de fabricación de mezclas bituminosas, es un problema común cuando se busca la modificación del betún. Este fenómeno es fruto de la diferencia de peso molecular, estructura, viscosidad y densidad entre el betún y los polímeros (Giavarini, De Filippis, Santarelli, & Scarsella, 1996). Para prevenirlo, es posible establecer el uso de tanques con sistemas de agitación en planta, pero esto requiere de una inversión que acaba repercutiendo en el precio final de la mezcla limitando su empleo.



Figura 26. Tanques de almacenamiento de betunes en planta de fabricación de mezclas.

Sumado a esto, incluso cuando el periodo de almacenamiento sin agitación pueda limitarse al transporte a obra, si este por algún motivo se prolonga o dichos equipos de agitación no están disponibles en la planta, puede producirse la separación macroscópica entre la fase de betún y de polímero en el tanque perdiendo el ligante su homogeneidad y, con ella, sus propiedades. Dicha pérdida de homogeneidad puede, además, derivar en problemas adicionales por la incapacidad de bombear la parte que concentra el polímero al ser esta demasiado viscosa. Por todo ello, lo más recomendable es la obtención, siempre que sea posible, de ligantes modificados que sean estables al almacenamiento.

La naturaleza del polímero empleado influencia en gran medida su estabilidad. En términos generales los polímeros de tipo SBS suelen presentar una estructura interna que favorece la estabilidad del ligante obtenido. Por el contrario, los polímeros de tipo plastómero como las poliolefinas tienen una mayor tendencia a presentar este tipo de problemas. Esto es debido a la presencia de largas cadenas poliméricas en las mismas que tienen tendencia a agruparse entre sí y cristalizar, lo que da lugar a una menor interacción con el betún y crea la inestabilidad del ligante resultante (Hunter et al., 2015).

Este hecho no implica necesariamente renunciar a las propiedades aportadas por este tipo de polímeros. Sin embargo, al igual que sucede con otros polímeros como el caucho donde la modificación es más un proceso físico, se debe poner un especial cuidado en cuando al porcentaje óptimo a añadir (el cual se suele situar entre el 3 % y el 5% en el caso de los plastómeros y máximos del 10% para el caucho) y las condiciones de mezclado (temperatura, tiempos, método de agitación, etc.) con el betún base de manera que se asegure que el ligante obtenido sea estable al almacenamiento.

2.3.2.1 Empleo de aditivos estabilizadores

Para mejorar la estabilidad de los polímeros se han buscado diversas soluciones a lo largo de los años. En la se pueden encontrar un pequeño resumen de los distintos sistemas y aditivos empleados, sus efectos y los polímeros para los cuales su empleo está más extendido:

Tabla 2. Métodos y aditivos empleados en la mejora de la estabilidad de betunes modificados con polímeros (Elaboración Propia).

Método/Aditivo estabilizador	Mecanismo de acción	Efecto	Polímeros de mayor empleo
Reducción de tamaño de partícula	Aumento de la superficie de contacto de los materiales. Por lo general menores a 2 mm	Reducción de la temperatura de interacción betún-polímero	Polímeros con elevadas temperaturas de fusión: caucho, HDPE, etc. (Bermejo-Muñoz et al., 2014; Hunter et al., 2015; Cuadri & Martín-Alfonso, 2017; Punith & Veeraragavan, 2007)
Adición de componentes ligeros (aceites aromáticos)	Suministro de componentes aromáticos para facilitar la integración del polímero	Contenidos excesivos pueden reblandecer en exceso el ligante e incluso comprometer la integridad del polímero (Polacco et al., 2015).	Cualquiera
Azufre	Interacción con los enlaces dobles C=C del betún y creación de enlaces sulfóxidos y polisulfóxidos que unen químicamente el polímero a este (Kalantar et al., 2012)	Mejora de la estabilidad al almacenamiento del caucho ya sea natural o sintético (Wen, Zhang, Zhang, Sun, & Fan, 2002)	Mayoritariamente caucho. Tanto previo a la incorporación del polímero como tras esta (Becker et al., 2001)
Ácido polifosfórico (PPA)	Reacción con grupos funcionales del betún rompiendo las aglomeraciones de asfaltenos facilitando su distribución homogénea en la fase de maltenos (Fee, Maldonado, Reinke, & Romagosa, 2010).	- Mejora de prestaciones de la mezcla a altas temperaturas sin perjudicar comportamiento a las más bajas (Behnood & Olek, 2017) - Disminución del ángulo de fase del betún (comportamiento más viscoso)	Uso aislado o como estabilizador de cualquier polímero
Nanocompuestos: bentonita, montmorillonita y derivados, caolinita...	Las cadenas poliméricas quedan embebidas en el espacio entre capas de las arcillas generando un nanocompuesto en el que la arcilla queda dispersa dentro de la matriz polimérica a escala nanométrica (Mansourian, Goahri, & Khosrowshahi, 2019)	- Aumento de rigidez - Reducción del ángulo de fase del betún modificado (comportamiento más elástico) (Magdy, Katti, Amir, Upadhyay, & Katti, 2014)	Cualquiera
Anhídrido maleico (MA)	Reacción con el betún y polímero mediante mecanismos de Diels-Alder, copolimerización y transferencia de cargas (Kang, Wang, & Chen, 2010)	-Mejora resistencia a fisuración a bajas temperaturas -Mejora cohesividad altas temperaturas (Polacco et al., 2015)	Cualquiera

Junto a estos métodos y aditivos, el caso del polvo de neumático supone un caso aparte. Para mejorar la interacción y estabilidad de las partículas añadidas al ligante habitualmente se ha buscado modificar la superficie del PNFU ya sea mediante reacciones químicas, injertos de otro polímeros, radiación o aplicación de gases. Con ello, se busca oxidar la superficie del PNFU para crear grupos polares de tipo peróxido, hidroperóxidos o carbonilos y aumentar así la interacción con el betún. La devulcanización del PNFU mediante procesos químicos, físicos o microbianos es otro de los métodos tradicionales para favorecer su incorporación a otros polímeros (Ramarad, Khalid, Ratnam, Chuah, & Rashmi, 2015).

En cualquiera de los casos, es importante aclarar que el empleo de cualquiera de estos aditivos implicará un considerable aumento del coste, ya por sí elevado, del betún modificado resultante limitando su empleo. Por este motivo, siempre que sea posible es preferible la obtención de sistemas estables mediante la optimización de contenidos y condiciones de mezclado en lugar del empleo de estabilizadores.

2.3.3 Problemática de la durabilidad. Envejecimiento de materiales bituminosos

Dentro del deterioro de las mezclas bituminosas no solo interviene la propia acción del tráfico (la cual influye de manera primordial) sino que el deterioro de los materiales que componen la mezcla con el paso del tiempo también juega un papel clave. Entra aquí el concepto del envejecimiento de las mezclas bituminosas ligado a la influencia de los procesos de fabricación, puesta en obra y condiciones ambientales a las que la mezcla se ve sometida durante su vida útil.

Dentro del envejecimiento de las mezclas, el ligante es el elemento más afectado. Se sabe que el betún es propenso al envejecimiento químico desde el inicio de su empleo en mezclas (Lesueur, Teixeira, Lázaro, Andaluz, & Ruiz, 2016). El envejecimiento de un ligante consiste principalmente en la pérdida de sus componentes más volátiles (cuyo contenido es actualmente bajo en los ligantes bituminosos comerciales ya estos se emplean en otros refinados del petróleo) junto con procesos de oxidación y reacciones poliméricas que conducen a cambios en su composición, en su estructura coloidal y en sus propiedades físico-químicas. Esto se traduce en un aumento de la viscosidad y rigidez del betún (Miró, Martínez, Moreno-Navarro, & del Carmen Rubio-Gámez, 2015) que da lugar a un endurecimiento del material y una pérdida de poder aglomerante (Orencio-Marrón et al., 2013; Zaidullin, Petrova, Yakubov, & Borisov, 2013). Debido a estos cambios pueden surgir problemas como:

- Pérdida de partículas por la menor capacidad de adhesión del ligante.

- Mayor probabilidad de fractura de la mezcla producida por la menor resistencia a la fatiga (más marcada a altas temperaturas de servicio) (Moreno-Navarro, Fernando, Sol-Sánchez, García-Travé, & Rubio-Gámez, 2018).
- Mayor tendencia hacia la fisuración térmica debido a la elevada rigidez del ligante envejecido (la cual lo vuelve más frágil).

Dentro del fenómeno del envejecimiento de materiales bituminosos se deben considerar dos etapas bien diferenciadas (Figura 27). En primer lugar, está el envejecimiento a “corto plazo” condicionado por las altas temperaturas a las cuales se ve sometida la mezcla durante los procesos de mezclado, almacenamiento, extendido y compactación de la misma. Por otra parte, el envejecimiento a “largo plazo” se refiere a los procesos que ocurren durante la vida de servicio de la mezcla bituminosa debido a la acción del oxígeno y la radiación ultravioleta. Existen distintos métodos de ensayo de laboratorio que permiten reproducir dichos mecanismos tanto a nivel de ligante (TFOT, RTFOT, PAV, RCAT, hornos UV, etc.) como a nivel de mezclas (ASTM D4124, 2001, ensayo de envejecimiento en atmósfera oxidante (PrUNE-EN, 2017), SATS (UNE-EN 12697-45, 2013), etc.).



Figura 27. Etapas en el proceso de envejecimiento de mezclas bituminosas.

La cantidad y velocidad a la que se produce el envejecimiento del ligante dependerá en buena medida de la naturaleza del betún. La composición de este a su vez, depende en buena medida del crudo de origen y su naturaleza (parafínica o nafténica). Esta influye no sólo en la composición genérica del mismo sino también en la estructura de sus fracciones (Gawel & Baginska, 2004). Por este motivo, es importante caracterizar apropiadamente los betunes que

deseamos emplear mediante ensayos como los reológicos, que nos permitan determinar su comportamiento a distintas temperaturas y frecuencias de carga antes y después de la simulación de su envejecimiento. Lo mismo es aplicable a los procesos de modificación de ligantes.

Más allá de la influencia del ligante, existen otros factores vinculados a la mezcla los cuales condicionaran el comportamiento de la misma a través de su influencia en la difusión del oxígeno y la interacción con los distintos componentes (Tauste et al., 2018b)):

- La temperatura de fabricación y puesta en obra. La tasa de oxidación se dobla por cada 10°C por encima de los 100°C (Hunter et al., 2015), lo cual se ha aprovechado tradicionalmente a la hora de simular los procesos de oxidación a largo plazo en laboratorio de manera acelerada (Lu, X., Redelius, & Talon, 2008) y es un aspecto importante a considerar cuando se determinan las condiciones de mezclado para la fabricación de ligantes modificados con polímeros.
- La compactación y el contenido de huecos de la mezcla, los cuales condicionan el acceso del oxígeno a la misma.
- El contenido de ligante. Mayores contenidos implican capas de mayor espesor y una menor penetración del oxígeno y la radiación UV.
- Condiciones ambientales: temperatura, diferencias en la composición del aire, clima, lluvia, radiación solar en distintas zonas (Apeageyi, 2011; Cong, Wang, Li, & Chen, 2012; Tarsi et al., 2018), etc.
- La influencia de los áridos: a través de su capacidad de absorción (Curtis, Ensley, & Epps, 1993), la interacción de los minerales de su superficie con el ligante (Petersen, Ensley, & Barbour, 1974) o la influencia de la naturaleza de los mismos a la hora de acelerar o retrasar la reacción entre el oxígeno y el betún (Wu, Jian-Tao, Han, Airey, & Yusoff, 2014)
- Modificación de ligantes. Influencia de la interacción polímero-ligante y la oxidación diferencial de ambos.

Al igual que en el caso de la estabilidad al almacenamiento existen aditivos empleados para limitar este problema, siendo los más comunes los aditivos antioxidantes. Estos actúan de dos maneras diferentes: ya sea inhibiendo la formación de peróxidos o mediante la absorción de radicales libres. Independientemente del tipo de aditivo, es necesario un estudio previo considerando distintos tipos de betún y las variaciones debidas la presencia de polímeros.

En este sentido, algunos de estos aditivos eran comunes también, en la mejora de la estabilidad al almacenamiento de betunes modificados. Este es el caso por ejemplo de aditivos de tipo montmorillonita y sus derivados (Yu, J., Feng, Zhang, & Wu, 2009; Zhang, Ji, Wang, Wu, Wang, & Wang, 2009; Cortes et al., 2010) que impiden el acceso de la radiación y el oxígeno al betún. No obstante, y al igual que los estabilizadores, el empleo de aditivos incrementa el coste final del betún.

2.3.3.1 Envejecimiento de ligantes modificados con polímeros

Tal y como se refleja en los factores que condicionan el envejecimiento de mezclas bituminosas, la adición de polímeros puede influir en el envejecimiento del betún dificultando el estudio de este fenómeno, especialmente cuando se analiza el comportamiento del material a largo plazo, ya que, además de los procesos de oxidación, la degradación del polímero también influye en el envejecimiento (Tauste et al., 2018b). El envejecimiento de los polímeros cubre cuatro etapas: inicio, crecimiento, transferencia y rescisión de los radicales libres (Li, Y. et al., 2010). Durante el envejecimiento, los radicales libres se forman debido a la ruptura de enlaces en las cadenas de polímeros por la exposición al calor o la luz. Estos radicales, en contacto con el oxígeno, dan lugar a radicales peróxidos que reaccionan de nuevo con el polímero dando lugar a nuevos radicales y retroalimentando el proceso.

Por otra parte, la degradación del polímero ha sido en ocasiones defendida por distintos autores como una forma de favorecer la resistencia al envejecimiento. No obstante, es importante constatar que la resistencia al envejecimiento se debe establecer considerando la capacidad de mantener la misma estructura polimérica que da función al ligante modificado y siempre, considerando el aumento de rigidez en términos porcentuales con respecto a la condición previa al envejecimiento.

Aunque el proceso general se aplica a los distintos polímeros empleados en la modificación de mezclas bituminosas, existen discrepancias entre la susceptibilidad de las diferentes tipologías a este fenómeno:

Plastómeros

En primer lugar, y en relación a los plastómeros, diversos autores han constatado una mejora de la resistencia al envejecimiento con respecto al betún base mediante el uso de polietileno (Becker et al., 2001; Kalantar et al., 2012). En este mismo sentido, Dehouche, Kaci, & Mokhtar (2012) compararon los efectos del envejecimiento del SBS con un betún modificado empleando etilvinilacetato (EVA). A partir de estos resultados se concluyó que el betún base y el modificado

con el plastómero de tipo EVA presentaban una mayor rigidez que el modificado con SBS tras su envejecimiento termo-oxidativo. No obstante, si se analizan los resultados en términos de variación la resistencia del EVA es más elevada, ya que también parte de una rigidez inicial mayor fruto de una dispersión mucho más fina del EVA en relación al SBS dentro de la matriz del betún. De igual modo, el betún modificado con SBS sufrió una mayor degradación del polímero.

Elastómeros (SBS)

Como ya se ha comentado, entre los polímeros más empleados en la modificación de betunes se encuentran los elastómeros termoplásticos, siendo el más extendido a nivel comercial el SBS. Sin embargo, diversos estudios constatan que aunque este polímero presenta generalmente una menor rigidez que el betún base (Lu, X. et al., 2008; Sun, Wang, & Zhang, 2014; Dessouky, Ilias, Park, & Kim, 2015) la variación de este parámetro tras el envejecimiento es mayor (Miró et al., 2015). Así, este presenta una menor resistencia al envejecimiento (ya sea producido por fenómenos de oxidación o por la acción de la radiación) que otros polímeros (Kalantar et al., 2012). Detrás de esta mayor susceptibilidad se encuentran dos principales razones:

- La presencia de dobles enlaces y a-H en los bloques del polímero (Zhu, Birgisson, & Kringos, 2014), lo cual da lugar a la aparición de reacciones químicas indeseables como, por ejemplo, la formación de radicales peróxidos e hidroperóxidos.
- La importante degradación del polímero durante el envejecimiento que impide que tras este la red polimérica del SBS se vuelva a formar, limitando así en buena medida su funcionalidad dentro del ligante (Cortizo, Larsen, Bianchetto, & Alessandrini, 2004; Wu, Shao-peng, Pang, Mo, Chen, & Zhu, 2009)

Caucho

En relación con el caucho, generalmente este es entendido como un polímero con una elevada resistencia al envejecimiento. Debido a ello, son numerosos los estudios que han propuesto su uso por sus propiedades anti oxidantes, las cuales se han demostrado a través de ensayos físicos y reológicos (Raad, Saboundjian, & Minassian, 2001; Ali, Mashaan, & Karim, 2013; Ghavibazoo, Abdelrahman, & Ragab, 2015). El caucho afecta a las dinámicas de envejecimiento de distintas formas:

- El caucho retarda la oxidación del betún a través de la liberación de agentes antioxidantes presentes en su composición, como por ejemplo el negro de carbón.
- El caucho continúa interactuando con el betún durante su envejecimiento mediante la absorción de aromáticos (Ghavibazoo et al., 2015).

- Algunos de los primeros radicales libres liberados por el polímero tras su degradación reaccionan con algunos de los componentes del betún, estableciendo un enlace entre ellos que protege, en cierta medida, a las fracciones de betún atrapadas dentro de la red polimérica de la oxidación (Ouyang et al., 2006)

La incorporación de este material como modificador es, por tanto, de gran interés desde el punto de vista del envejecimiento ya que introduce elementos comúnmente empleados por los aditivos antioxidantes sin la necesidad de una inversión adicional que incrementaría el coste del betún final resultante.

En cualquiera de los casos, el envejecimiento de los betunes modificados con caucho no es siempre sencillo de precisar ya que los ensayos de envejecimiento más extendidos (RTFOT y PAV) inducen significativos cambios estructurales en el ligante y el tamaño de las partículas de polímero residuales. Por ello, es necesario poner especial atención a la repetibilidad de los resultados obtenidos en estos casos y combinar distintos tipos de análisis para contrastar los efectos observados.

Estas diferencias de comportamiento, vuelven a dar idea de la importancia de una adecuada caracterización (mediante reología y otras técnicas que evalúen la microestructura del ligante) del betún base antes y después de la modificación y también a largo plazo tras el envejecimiento del material. Solo de este modo es posible lograr una imagen clara de la manera en que el polímero elegido, su cantidad, tamaño y condiciones de mezclado afectarán a las propiedades mecánicas y estructura interna obtenidas y como estas evolucionarán a lo largo de la vida útil del material.

A tenor de lo arriba expuesto, los polímeros con mayor resistencia al envejecimiento de entre las tipologías habitualmente empleadas serían, por un lado, los plastómeros (en especial los de tipo poliolefínico) y por otro, el caucho por sus propiedades antioxidantes y mayor facilidad de conservar su estructura interna tras el envejecimiento. Ambos presentan una menor variación de sus propiedades que los polímeros de tipo SBS empleados habitualmente por lo que, en términos de durabilidad, su empleo podría ser una interesante alternativa frente a estos.

Tal y como se ha mostrado, siempre que se garantice la estabilidad al almacenamiento de los ligantes desarrollados a partir de estos productos y su resistencia al paso del tiempo (a través del análisis de su envejecimiento), los polímeros reciclados pueden ser de gran utilidad a la hora de extender las ventajas de esta tecnología a un mayor número de aplicaciones.

Considerando dicho potencial, en los siguientes apartados se expone una revisión detallada de los polímeros reciclados cuyo uso está más extendido: polietileno (PE), polipropileno (PP), cloruro de polivinilo (PVC), etilvinilacetato (EVA) y caucho reciclado procedente de neumáticos (GTR, por sus siglas en inglés). Para cada uno de ellos, se muestran las principales propiedades de cada polímero, su disponibilidad como material reciclado, la forma y cantidad en que estos son habitualmente empleados y la variación de propiedades mecánicas que generan en los materiales bituminosos, incidiendo en la forma en la que es posible obtener procesos de modificación estables (Brasileiro et al., 2019). De este modo, se logra obtener una visión práctica de los requisitos, beneficios y limitaciones de cada tipo de polímero la cual ayudará a seleccionar los más adecuados para la consecución de los objetivos de esta tesis.

2.3.4 Empleo de Polietileno (PE) reciclado

2.3.4.1 Características

El polietileno es un polímero termoplástico de la familia de las poliolefinas. Su punto de fusión oscila entre los 110 y 120°C en el caso del LDPE (Jun, Yuxia, & Yuzhen, 2008; Al-Hadidy & Yi-qiu, 2009; Vargas, Vargas, Sánchez-Sólis, & Manero, 2013), alrededor de los 125 °C para el LLDPE, y entre los 130 y los 149°C para el HDPE (Attaelmanan, Feng, & Al-Hadidy, 2011; Lastra-González et al., 2016; Fernandes, Costa, Silva, & Oliveira, 2017) todas ellas temperaturas inferiores al rango de temperaturas establecido para la fabricación de mezclas bituminosas. Esto ayudará a la integración de dichos polímeros dentro de estas ya que, a medida que el punto de fusión esté más lejos de la temperatura de la mezcla, menores tiempos y velocidades de mezclado serán necesarios. Además, a estas temperaturas de calentamiento, este tipo de polímero no emite ningún tipo de gas nocivo lo cual es un factor importante a considerar en su empleo (Vasudevan, Sekar, Sundarakannan, & Velkennedy, 2012).

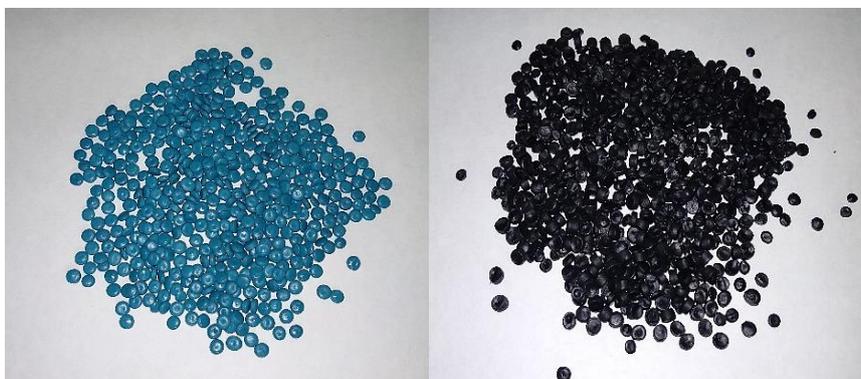


Figura 28. Polímero termoplástico reciclado de tipo polietileno lineal de baja densidad (LLDPE, izquierda) y de alta densidad (HDPE, derecha).

2.3.4.2 Disponibilidad

Dentro de los polímeros reciclados, el polietileno es el que presenta un mayor mercado ya que supone el 29.8 % del total de la producción total a nivel europeo. Dentro de este porcentaje, un 17.5% se corresponde a polietileno de baja densidad y polietileno lineal de baja densidad (LDPE y LLDPE, por sus siglas en inglés) como los presentes en bolsas reutilizables, bandejas, recipientes, embalajes de alimentos o plásticos y geomembranas empleadas en el sector agrícola; mientras que el 12.3% restante corresponde al polietileno de alta densidad (HDPE, por sus siglas en inglés) presentes en juguetes, algunos tipos de botellas, tuberías y diversos objetos de menaje (Plastics Europe. Association of Plastics Manufactures, 2018).

La gran variedad de aplicaciones en las que el polietileno está presente hace de este un polímero con gran potencial de utilización. En este sentido, existe en muchos países una importante red de reciclaje de plásticos de este tipo vinculada al consumo doméstico. No obstante, por motivos estéticos (tonalidad o textura homogéneos) o de eficiencia industrial, estos no son siempre efectiva o atractivamente reutilizables, por lo que la aparición de usos como la modificación de materiales bituminosos (para los cuales el tratamiento previo necesario del material podría ser menos exigente) constituye una nueva vía de empleo que ayude a aumentar su tasa de reciclaje efectivo.



Figura 29. Ejemplos de fuentes de polietileno procedentes de consumo doméstico.

Junto a esto, existen otras fuentes de empleo que, por sus características, no permiten el aprovechamiento directo del material. Un buen ejemplo de esto son las bolsas de tipo silo para el de almacenaje de cereales en granjas (Angelone, Casaux, Borghi, & Martinez, 2016) o las geomembranas empleadas en la industria de la impermeabilización.

En relación a estas últimas, la producción anual de este tipo de industria se estima en 300 millones de metros cuadrados al año (Müller & Saathoff, 2015) y, debido al gran número de aplicaciones de ese material (agrícolas, medioambientales, geotécnicas, transporte hidráulico y otros trabajos de ingeniería), existe un elevado número de potenciales fuentes de este residuo durante la construcción o rehabilitación de muchas infraestructuras (presas de regadío, obras de encauzamiento, vertederos, canales, lagos artificiales, estanques, etc.). Estos materiales habitualmente incorporan el polímero como tal (normalmente de tipo poliolefínico: polietileno de distinta densidad o combinación de estos con polipropileno) en la capa impermeable, así como una red de fibras de poliéster en la capa de refuerzo para resistir esfuerzos cortantes, de tensión y de punzonamiento. La presencia de estas fibras es la responsable de impedir el reciclaje directo de este material tras su deterioro a través de un fundido y remolde para elaborar nuevas geomembranas.



Figura 30. Ejemplo de empleo de polietileno como geomembrana en impermeabilización y distintos usos agrícolas.

Sin embargo, la presencia de dichas fibras constituye también una posibilidad de extender las ventajas aportadas por el empleo de fibras en materiales bituminosos (reducción de las deformaciones plásticas y mejora de la resistencia a la fisuración por fatiga) a las ya proporcionadas por el plastómero creando, al dispersarse durante el mezclado, una red elástica tridimensional que mejore la estabilidad y ayude a disipar las tensiones generadas en el material (Chen, Jian-Shiuh & Lin, 2005; Abtahi et al., 2010; Moreno-Navarro, F., Sol-Sánchez, Rubio-Gómez, & Segarra-Martínez, 2014). Aparte de estos componentes principales, las geomembranas también incorporan distintos aditivos como tintes, antioxidantes y estabilizadores térmicos y de radiación UV, los cuales pueden ayudar a mejorar la resistencia a los agentes ambientales y al envejecimiento del betún modificado con este residuo.

2.3.4.3 Aplicabilidad dentro de mezclas bituminosas

Vía seca

Existen diversas experiencias del empleo de distintos tipos de PE por vía seca. En este sentido, se ha estudiado el uso de polietileno de baja densidad (LDPE) como sustituto de distintas fracciones de árido (desde 0.3 mm y hasta tamaños cercanos a los 5 mm) en contenidos que van desde el 1 al 30% del peso total de áridos, implicando un mayor consumo de betún (Zoorob & Suparma, 2000; Qadir & Imam, 2005).

Para estas experiencias, se han encontrado mayores rigideces y mejoras en la estabilidad Marshall, resistencia a tracción indirecta, deformaciones y susceptibilidad al agua (Huang, Bird, & Heidrich, 2007; Angelone et al., 2016; Lastra-González et al., 2016). No obstante, y a pesar de las mejoras comentadas, dados los bajos puntos de fusión de este tipo de polímeros, la investigación de la modificación de las mezclas por vía húmeda es un campo mucho más extendido y en el que se ha profundizado más.

Vía húmeda

El empleo de polietileno reciclado como modificador del ligante presenta distintas ventajas e inconvenientes que se pueden consultar en la Figura 31. Dentro de los distintos tipos de polietileno, el polietileno lineal de baja densidad (ya sea convencional o lineal), es uno de los que ha mostrado resultados más prometedores a la hora de modificar materiales bituminosos (Punith & Veeraragavan, 2010; Cuadri et al., 2016). No obstante, a la hora de establecer su uso y, al igual que el resto de los plastómeros, es importante garantizar la estabilidad al almacenamiento a altas temperaturas del ligante resultante en ausencia de agitación.

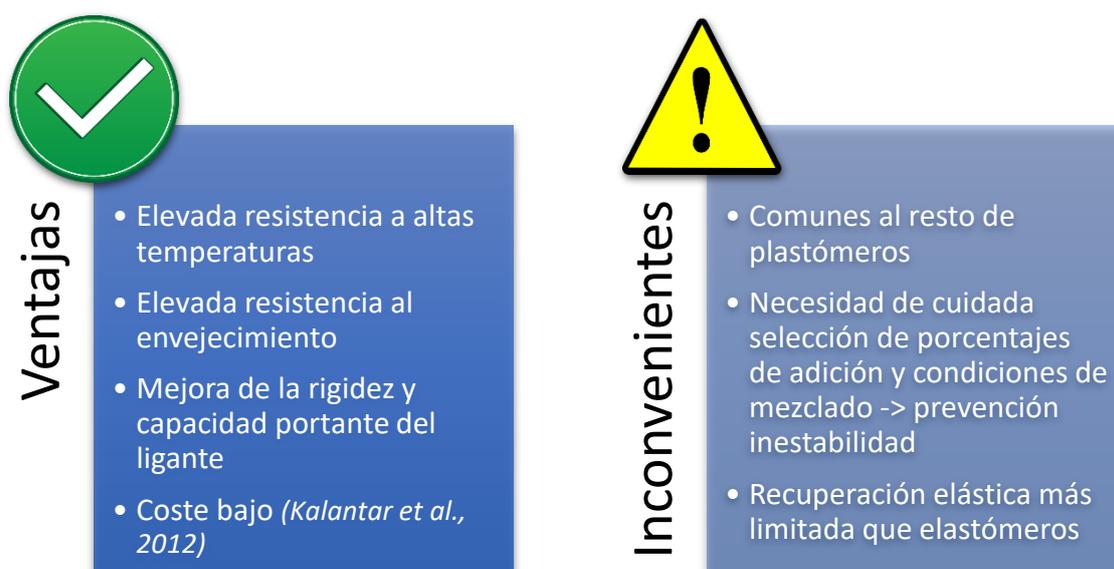


Figura 31. Ventajas e inconvenientes del empleo de polietileno reciclado como modificador de ligantes.

Condiciones de incorporación

Previo a la incorporación del polímero como modificador del betún, existen diversas formas de tratarlo. Este puede ser lavado, secado y extruido (Ahmedzade, Fainleib, Günay, & Grygoryeva, 2014; Fang et al., 2014; Hu et al., 2015) o, si el polímero está lo suficientemente limpio, puede ser directamente incorporado o triturarse para ser reducido a partículas de menor tamaño, lo cual facilitará su posterior integración con el ligante base. Los tamaños de partícula normalmente seleccionados suelen variar entre 0.3 y 2 mm (Wong et al., 2017; Punith & Veeraragavan, 2007; García-Travé, Tauste, Moreno-Navarro, Sol-Sánchez, & Rubio-Gámez, 2016; Ma et al., 2016).

En cuanto a los porcentajes de adición de este tipo de plastómero, en la bibliografía se encuentran estudios que emplean entre el 1 y el 10 % por peso de ligante. No obstante, los porcentajes más empleados se sitúan entre el 3 y el 5% (Figura 32).

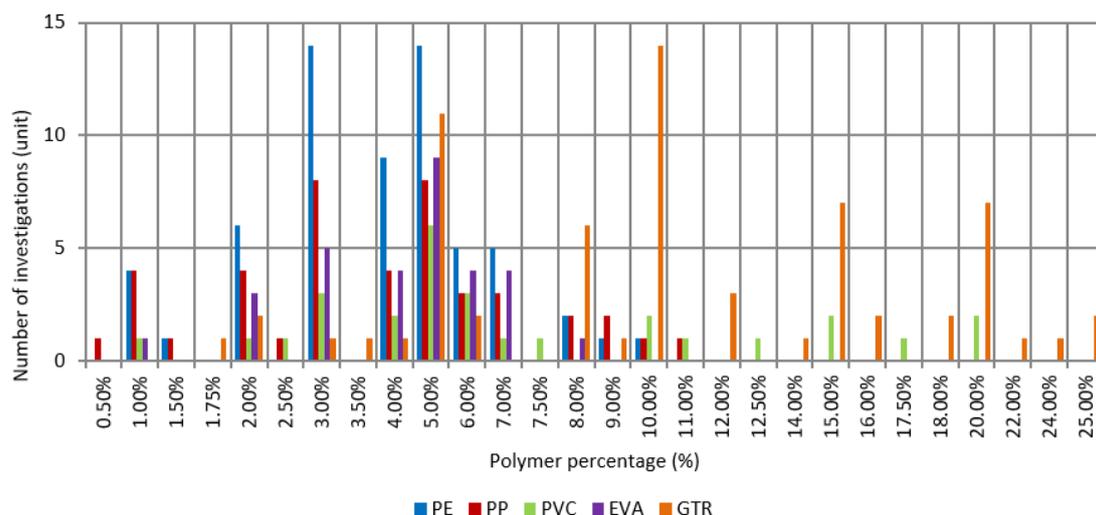


Figura 32. Distribución del estudio de distintos porcentajes de polímeros reciclados en la bibliografía (Brasileiro et al., 2019).

En términos generales, las condiciones de mezclado (temperaturas, tiempos y velocidades de agitación) son uno de los factores para los cuales existe mayor variabilidad dentro del empleo de una misma tipología de polímero. De este modo, para el caso de polietileno las temperaturas de mezclado oscilan entre 150 °C y 180 °C, los periodos de mezclado oscilan entre los 3 minutos y las 4 horas y las velocidades de mezclado entre 120 y 7200 rpm (Brasileiro et al., 2019).

Aunque, a priori, estas variaciones pueden parecer excesivas, estos valores deben considerarse como una orientación del rango dentro del cual es posible realizar una modificación usando un determinado polímero, atendiendo a las condiciones para las cuales otros autores lo han

conseguido. En este sentido, se debe tener en cuenta que dentro de un tipo de polímero pueden existir distintas tipologías (como los polietilenos de distinta densidad, o los polipropilenos de distinta naturaleza) con distintos requisitos para su mezclado. De igual modo, factores como el betún base, la viscosidad del mismo o el tamaño de partícula elegido condicionarán la temperatura y tiempos necesarios para realizar la modificación.

Características de los betunes modificados

Aunque como ya se ha comentado, los ensayos de penetración (UNE-EN 1426, 2015) y determinación del punto de reblandeciendo (UNE-EN 1427, 2015) presentan limitaciones a la hora de caracterizar el efecto de los polímeros en la modificación por vía húmeda de mezclas bituminosas, su simplicidad hace que su empleo esté aún muy extendido y permiten obtener una primera visión a grandes rasgos de los cambios producidos en el ligante, principalmente en términos relativos a la rigidez de este.

En este sentido, en el artículo de Brasileiro et al. (2019) se incluyó una muestra de la variación de estos parámetros para distintos porcentajes de adición de polímeros reciclados en términos porcentuales ya que, los betunes base de los distintos estudios no tienen por qué tener en principio las mismas características.

Variación de propiedades básicas

- Penetración

Si consideramos los porcentajes de adición más comunes para este tipo de poliolefinas, encontramos reducciones medias en torno al 24% cuando se añade un 3% de polietileno y alrededor del 45% cuando añadimos un 5%. La menor tasa de variación se corresponde con el empleo de LDPE sobre un betún de penetración 81 dmm (Jun et al., 2008) mientras que las mayores variaciones se corresponde con betunes base más duros, con penetraciones de 50 dmm y 67 dmm (propias de un betún tipo B 50/70) cuando se incorpora LLDPE y LDPE respectivamente (García-Travé et al., 2016; Wong et al., 2017).

- Temperatura de reblandecimiento

Para el caso del menor porcentaje de adición de entre los más comunes para este tipo de plastómero (el 3 %), la variación media obtenida es del orden del 16,5%, encontrando que las diferencias entre la mayor y menor variación para este porcentaje -en los estudios de Attaelmanan et al. (2011) y Costa, Fernandes, Silva, & Oliveira (2017) respectivamente- parecen mostrar que se produce una mayor variación para los betunes base de mayor penetración y menor temperatura de reblandecimiento inicial.

Para un contenido del 5% de PE sobre el peso de betún, se observa que, al igual que ocurría con la penetración y pese a las variaciones observadas, en promedio la variación de estas propiedades aumenta a medida que lo hace el contenido de polímero añadido, llegando en este caso a un 39.5%. Para este contenido también es posible analizar el modo en el que la adición de agentes estabilizadores como el anhídrido maleico (MA, por sus siglas en inglés) influyen en las propiedades del ligante obtenido. Así, en el estudio de Jun et al. (2008) y para un 5% de LDPE la variación de la temperatura de reblandecimiento aumenta desde el 14% hasta el 91.5% cuando el polímero es injertado con MA.

Esto confirma la necesidad de que, siempre y cuando se incorpore algún tipo de aditivo a la modificación, es necesario poner especial cuidado en estudiar el efecto de este, no únicamente en la estabilidad del betún obtenido, sino en las propiedades mecánicas del mismo. De igual forma no debe considerarse una condición determinada (como en el caso del ensayo de determinación de la temperatura de reblandecimiento) sino todo el rango de temperaturas de servicio del ligante y distintas condiciones de carga.

Por otra parte, se observa cómo una tendencia opuesta del punto de reblandecimiento en relación a la penetración del betún base vista previamente. Esto es indicativo de que la influencia del betún base es solo uno de los factores que condicionan la modificación del ligante obtenida. Tal y como se refería, el tamaño, tratamientos previos y naturaleza del ligante junto con las condiciones de mezclado (temperatura, tiempo y tipo de mezclador), influirán también de manera decisiva dichos cambios (Hınıslioğlu & Açar, 2004; Modarres & Hamed, 2014; Napiyah, Habib, & Kamaruddin, 2014).

Por este motivo, el empleo de un estudio reológico que caracterice adecuadamente el ligante a emplear como base, la influencia de distintos porcentajes de polímero y la evaluación de cómo afectan las distintas condiciones de mezclado, será de vital importancia a la hora de obtener un betún modificado de las mejores prestaciones posibles.

- Viscosidad

Este parámetro será un factor clave para garantizar la trabajabilidad de la mezcla a la que se incorpora el betún modificado con polímeros. En términos generales, los betunes modificados suelen presentar valores más altos de viscosidad a medida que el contenido de polímero se incrementa, y el polietileno no supone una excepción (Casey et al., 2008; Hu et al., 2015; Ma et al., 2016).

Este aumento puede resultar beneficioso teniendo en cuenta que permite incrementar el contenido de betún sin riesgo de escurrimiento, no obstante, la viscosidad también debe mantenerse dentro de unos límites que garanticen la posibilidad de bombeo del ligante y la trabajabilidad de la mezcla. En este sentido el Strategic Highway Research Program (SHRP) plantea un criterio de viscosidad límite de 3 Pa.s a la temperatura de 135°C determinada mediante el ensayo (UNE-EN 13302, 2018).

Aunque la adición de polietileno supone un incremento de viscosidad con respecto al betún base, este suele ser de menor proporción que en el caso de los elastómeros termoplásticos tipo SBS comúnmente empleados en la obtención de betunes modificados comerciales. En este sentido, y para las cantidades de polietileno comúnmente empleadas (3 y 5% por peso de ligante), no es habitual que los betunes modificados con este material superen el límite previamente comentado, garantizando una buena trabajabilidad de las mezclas a las que se incorpora (Ahmedzade et al., 2014; Napiah et al., 2014; Fernandes et al., 2017).

- Ductilidad

Otro de los efectos observados tras la adición de polietileno, es una reducción en la ductilidad del ligante, esto se traduce en una mayor capacidad de resistir las cargas del tráfico sin deformar. Sin embargo, si dicha reducción es excesiva, también puede generar un comportamiento demasiado frágil de la mezcla a bajas temperaturas que dé lugar a problemas de fisuración (Attaelmanan et al., 2011; Costa et al., 2017).

De esta forma, y considerando que la reducción de ductilidad también será más significativa al aumentar el porcentaje de polímero, para contenidos de PE del orden del 5% se han registrado en la bibliografía reducciones alrededor del 35% a 25°C (Ahmedzade et al., 2014; Attaelmanan et al., 2011) y de hasta el 97% a 15°C (Yan et al., 2015). Estos resultados confirman uno de los principales inconvenientes del empleo de polímeros termoplásticos, el riesgo de una rigidez demasiado elevada que ocasione fisuración a bajas temperaturas.

Por ello, es importante cuando se evalúa el empleo de este tipo de polímeros analizar, en primer lugar, el comportamiento del betún a bajas temperaturas mediante ensayos tipo BBR o parámetros reológicos que evalúen la ductilidad como el Glove-Rowe Parameter (Rowe & Sharrock, 2016) y, por otro lado, el comportamiento de la mezcla en su conjunto con ensayos que evalúen la fisuración a distintas temperaturas.

Variación de comportamiento reológico

En relación a los cambios reológicos observados en otros estudios, estos coinciden en que la adición del polietileno reciclado conlleva un considerable incremento del módulo de rigidez complejo del betún (G^*) acompañado de una reducción en el ángulo de fase. Estas variaciones aumentan a medida que se incrementa el contenido de polímero y suelen ser más marcadas en el caso del polietileno de alta densidad (HDPE) al comparar, para mismo betún base y misma cantidad de polímero, con las tipologías de baja densidad (LDPE o LLDPE) (Murphy, O'mahony, Lycett, & Jamieson, 2001; Pérez-Lepe, Martínez-Boza, & Gallegos, 2005; Amin, Khan, & Saleem, 2016; Ge, Yan, You, & Xu, 2016).

Estos cambios conllevan una mayor capacidad portante y una respuesta más elástica del material, lo que se traduce en una mayor resistencia frente a las deformaciones plásticas, especialmente a altas temperaturas cuando se compara con el betún base. No obstante, y al igual que ocurre con la mayoría de polímeros termoplásticos, la mejora en lo referente a recuperación elástica es considerablemente menor que la que se obtenida con elastómeros termoplásticos como los SBS presentes en la mayoría de betunes modificados en refinería (Roman, Cuadri, Liashenko, García-Morales, & Partal, 2016; Costa et al., 2017).

Estabilidad al almacenamiento

Finalmente, ya se ha incidido en la importancia de la evaluación de la estabilidad al almacenamiento a altas temperaturas de los ligantes modificados y cómo, la necesidad de empleo de sistemas de agitación si esta no es alcanzada, puede repercutir en el coste final del ligante y su aplicabilidad. Tal y como se refería en la sección dedicada a este problema, la estructura de los polímeros termoplásticos (como las poliolefinas entre las que se encuentra el polietileno) los hace especialmente susceptibles a agruparse entre sí y cristalizar, provocando problemas de interacción con el betún base y generando separación de fases como las encontradas en distintos estudios (Polacco et al., 2005; Vargas et al., 2013; Fang et al., 2014). Esto no implica necesariamente que no sea posible obtener betunes estables empleando polietileno, pero sí la necesidad de un especial cuidado en la elección del proceso de mezclado y cantidades y tamaños del polímero a incorporar, evaluando tras la modificación la estabilidad del sistema final.

De este modo, estudios como los de Casey et al. (2008) para contenidos del 3% de LDPE y HDPE por peso de ligante o el de García-Travé et al. (2016) para 3 y 5% de LLDPE por peso de ligante,

demuestran que es posible obtener ligantes modificados con PE estables. En este sentido, Liang et al. (2019) analizaron mediante simulaciones numéricas y microscopía de fluorescencia la evolución de la estabilidad al almacenamiento de distintos tipos de polietileno empleados en un porcentaje del 5% por peso de betún, encontrando que el polietileno lineal de baja densidad (LLDPE) resultaba el más estable.

Otra opción para conseguir de manera más sencilla betunes modificados estables es el empleo de agentes estabilizantes, sin embargo, tal y como se ha referido, el uso de estos encarece el coste final de ligante terminando con una de las principales bazas del empleo de polímeros reciclados, la reducción de costes vinculada al ligante. Entre los aditivos y tratamientos más empleados para este tipo de polímero se encuentran:

- El empleo de ácido maleico (MA) para mejorar la polaridad del polímero. Siempre y cuando su empleo no sea excesivo, además de la mejora de la estabilidad, permite obtener una menor susceptibilidad térmica y, lo que es más útil dada la rigidez introducida por el PE, un considerable incremento de la ductilidad (Jun et al., 2008; Vargas et al., 2013; Ma et al., 2016).
- El ácido polifosfórico (PPA) cuyo empleo ayuda a acentuar los cambios reológicos observados a altas temperaturas (Baumgardner, Masson, Hardee, Menapace, & Williams, 2005; Casey et al., 2008; Nuñez et al., 2014).
- El empleo de organo montmorillonita (OMMT) también ha demostrado ser útil en la mejora de la estabilidad al almacenamiento (Morawiec et al., 2005).
- Ahmedzade et al. (2014) exploraron la irradiación del polietileno con electrones para permitir la formación de radicales libres que contribuyesen a facilitar la formación de enlaces químicos entre el betún y el polímero.

Tereftalato de polietileno (PET)

Existe por último, otra tipología de polietileno comúnmente empleada en la sociedad actual, el tereftalato de polietileno (más conocido por sus siglas en inglés, PET) (Figura 33), el cual supone un 7.4 % de la producción a nivel europeo y está muy presente en botellas y materiales textiles.

Sin embargo, y a diferencia de otros tipos de polietileno, su punto de fusión se sitúa alrededor de los 250°C lo cual limita en gran medida su empleo como modificador de materiales bituminosos (cuyas temperaturas de fabricación son mucho menores e inferiores a los 180°C) (Casey et al., 2008; Gürü, Çubuk, Arslan, Farzaniyan, & Bilici, 2014). Esto hace que este tipo de polímero pueda ser reutilizado de manera más eficiente en otro tipo de industrias (Shukla, Harad, & Jawale, 2009; Fraternali et al., 2011).



Figura 33. Partículas de PET empleadas en la modificación por vía seca (Modarres & Hamedi, 2014).

Debido a ello, las experiencias existentes del empleo de este material en mezcla bituminosas se suelen limitar a la vía seca y se asocian a un empleo, más como refuerzo a través de fibras o fíller polimérico, que como modificador del material propiamente dicho. En este sentido, existen diversas experiencias en la bibliografía que emplean este polímero en tamaños que se sitúan normalmente entre los 0.4 y los 2.36 mm. En relación a los contenidos empleados, estos varían del 2 y al 10% por peso de mezcla considerándose como óptimo porcentajes entre el 4 y el 6% (Ahmadinia, Zargar, Karim, Abdelaziz, & Ahmadinia, 2012; Moghaddam, Karim, & Syammaun, 2012; Sojobi, Nwobodo, & Aladegboye, 2016).

Aunque mediante la adición del material se han reportado mejoras en la resistencia de la mezcla a las deformaciones a altas temperaturas y un menor escurrimiento de ligante, también es habitual un peor comportamiento frente a la acción del agua vinculado a una peor adhesión entre ligante y áridos (Modarres & Hamedi, 2014) que se acrecienta a medida que aumenta el contenido de polímero. Esto se debe a un menor espesor de la película de betún que recubre los áridos al emplearse parte de este en la interacción con el polímero.

2.3.5 Empleo de Polipropileno (PP) reciclado

2.3.5.1 Características

Al igual que el polietileno, el polipropileno (PP) es un polímero termoplástico de tipo poliolefínico. Dentro de los propilenos (PP), existe una distinción en función de su estructura interna denominada tacticidad, la cual influye en las propiedades de los mismos. Las moléculas de PP se componen de una cadena principal de átomos de carbono enlazados entre sí, de la cual cuelgan grupos metilo (CH₃-) a uno u otro lado de la cadena. Cuando todos los grupos metilo están del mismo lado se habla de polipropileno isotáctico (iPP) mientras que cuando estos no tienen un orden aparente, hablamos de polipropileno atáctico (aPP). Aunque el PP de tipo

isotáctico no se usa de manera comercial para la modificación de ligantes, sí existen experiencias con material reciclado (Nien, Yeh, Chen, Liu, & Chen, 2008; Yeh, Nien, Chen, Chen, & Chen, 2005). El PP de tipo atáctico si se emplea en modificación, no obstante, su uso se centra principalmente en revestimiento de tejados, no en mezclas bituminosas (Kalantar et al., 2012).



Figura 34. Polímero termoplástico de tipo polipropileno (PP).

Su punto de fusión es algo más elevado que el del HDPE y se sitúa alrededor de los 162°C (Al-Hadidy & Yi-qiu, 2007; Ahmedzade, Demirelli, Günay, Biryán, & Alqudah, 2015; Al-Abdul Wahhab, Dalhat, & Habib, 2017) lo que hace que la modificación empleando este material requiera mayores temperaturas y tiempos de mezclado que el resto de poliolefinas. No obstante, y al igual que el polietileno, este polímero no emite gases nocivos al calentarse (Vasudevan et al., 2012).

2.3.5.2 Disponibilidad

Es el segundo polímero con mayor producción a nivel europeo representando un 19.3% del total (Plastics Europe. Association of Plastics Manufactures, 2018) y se puede encontrar en una gran cantidad de elementos como envoltorios de carácter alimentario, recipientes para microondas, tuberías, partes de automóviles, etc.



Figura 35. Ejemplo de distintas fuentes de polipropileno reciclado.

2.3.5.3 Aplicabilidad dentro de mezclas bituminosas

Vía seca

Existen estudios que han empleado distintos porcentajes de PP como modificador de mezclas bituminosas por vía seca pero su empleo, en este caso, corresponde más a un uso como fibra (de manera similar a su empleo en hormigones (Abtahi et al., 2010)) que como sustituto de áridos (Tapkın, 2008a).

Pese a ello, también existen experiencias como las de Lastra-González et al. (2016) (en forma de filler) o Angelone et al. (2016) (con tamaño máximo de árido de 5 mm) para las cuales se han demostrado mejoras en términos de rigidez y resistencia a deformaciones permanentes de la mezcla a las que se incorpora, aunque en menor proporción que en el caso del polietileno.

Vía húmeda

Condiciones de incorporación

En cuanto a su empleo por vía húmeda, este se incorpora en porcentajes que van desde el 0.5 al 11% por peso de ligante, sin embargo, los contenidos más empleados se sitúan entre el 3 y el 5%.

En cuanto a las condiciones de mezclado, encontramos unas velocidades de mezclado similares a las de los polietilenos, con unos tiempos de mezclado entre 5 y 90 minutos (existe menor variabilidad que en el caso del PE por estar menos extendido su empleo) y unas temperaturas de mezclado algo mayores que para el PE (entre 160° y 190° C) debido al mayor punto de fusión de este polímero (Brasileiro et al., 2019). No obstante, las variaciones de estos parámetros son algo menores que en el caso de los distintos tipos de polietileno, especialmente para los contenidos más altos.

Características de los betunes modificados

Cuando este material es incorporado como modificador, es posible obtener ligantes más rígidos donde se produce una importante reducción de la penetración y un considerable aumento de la temperatura de reblandecimiento (Kalantar et al., 2012). Al igual que otros plastómeros, el polipropileno (PP) permite expandir el rango de comportamiento plástico del material mejorando la resistencia a la carga del ligante.

Variación de propiedades básicas

- Penetración

En el caso de la reducción de la penetración, esta oscila entre una reducción promedio del 24% para el caso de la adición de un 3% de PP y un 43.5% al añadir un 5% por peso de ligante (Figura 49). Al igual que ocurría con el polietileno, la menor tasa de variación se corresponde con betunes base de mayor penetración (160 dmm, (Casey et al., 2008)) mientras que menores contenidos de PP aplicado a betunes de penetración más baja, dan lugar a mayores tasas de cambio. Es el caso del estudio de Al-Hadidy & Yi-qiu (2007), en el que se emplea un 3% de PP sometido a degradación térmica (pirólisis) añadido a un betún base de penetración 42 dmm.

De nuevo aquí, al igual que sucedía con el polietileno (PE), el uso de anhídrido maleico (MA) como agente estabilizador contribuye a que los cambios de penetración y temperatura de reblandecimiento se hagan más marcados (Ahmedzade et al., 2015).

- Temperatura de reblandecimiento

En cuanto a la temperatura de reblandecimiento, el incremento promedio de este parámetro va desde el 11% para el empleo de un 3% de PP, al 21% cuando el contenido es del 5% por peso de ligante. Al igual que ocurre para otros plastómeros, es posible comprobar cómo de nuevo la variación de la temperatura de reblandecimiento es menor que la producida en la penetración del ligante. Esta variación se acentúa a medida que se incorpora un mayor contenido de polímero dentro de los rangos que se consideran óptimos para el mismo (por debajo del 5-6%), siendo inferior a la encontrada en el caso del polietileno (PE). Al igual que ocurría antes, las mayores variaciones se logran cuando se emplean aditivos como el anhídrido maleico (MA) sobre betunes base de menor temperatura de reblandecimiento inicial y mayor penetración (Ahmedzade et al., 2015).

- Viscosidad

Tal y como ocurría con el polietileno (también de naturaleza poliolefínica), incluso para altos contenidos de polímero, el incremento de viscosidad no es excesivo lo que ayuda a no comprometer la trabajabilidad de la mezcla a la que se incorpora. Esto se comprueba tanto en estudios que emplean propileno isotáctico (iPP) (Yeh et al., 2005; Nien et al., 2008), como propilenos clorados (Nien et al., 2008) o aditivados con estabilizadores de tipo MA (Yeh et al., 2005; Ahmedzade et al., 2015). Para ninguno de los casos anteriores se supera el límite de 3.0 Pa.s at 135 °C (Dalhat & Wahhab, 2015) propuesto por el SHRP.

No obstante, aunque esta es la tendencia general, no se debe olvidar que en la consecución de un ligante que no sea excesivamente viscoso intervienen muchos más factores aparte de la naturaleza del polímero, como la forma en que este se integra (por ejemplo, a través del tamaño de partículas), el tiempo y temperatura de digestión (si son excesivos darán lugar a una mayor viscosidad) o la viscosidad y penetración del betún base. Un ejemplo de este último factor se encuentra en el estudio de Casey et al. (2008) donde para un mismo tipo y contenido de polipropileno, un betún de penetración 62 dmm y viscosidad 0.41 Pa.s mostró un incremento de viscosidad mucho menor que el encontrado en otro ligante de mayor penetración (98 dmm) y menor viscosidad inicial (0.31 Pa.s).

- Ductilidad

De igual modo que ocurre con la mayoría de plastómeros, la adición de polipropileno (PP) tiene un efecto negativo vinculado al aumento de la rigidez, la reducción de la ductilidad del ligante. En este caso, al igual que las variaciones de punto de reblandecimiento y penetración son menores que en el caso del polietileno, también lo es la reducción de la ductilidad, que suele presentar valores en torno a un 20% menores que el betún base para un 5% de PP sobre peso de betún (Al-Hadidy & Yi-qiu, 2007). De igual modo, la adición de estabilizadores como el anhídrido maleico (MA) reduce este efecto hasta un 5% (Ahmedzade et al., 2015).

Variación de comportamiento reológico

En relación a los cambios en las propiedades reológicas del material, los cambios de módulo complejo de rigidez (G^*) y ángulo de fase siguen la misma tendencia ya referida para el polietileno, la cual supone la principal ventaja del empleo de plastómeros en la modificación de betunes. Al añadir PP se produce un aumento de la rigidez y del comportamiento elástico de estos a altas temperaturas, lo que permite una mayor resistencia a las deformaciones permanentes a medida que se incrementa el contenido de polímero añadido. En este sentido, como ya hemos visto en la variación de otros parámetros, el PP introduce una modificación ligeramente inferior a la encontrada para el PE. Los mejores resultados se obtienen cuando se añade un contenido de PP del 5% sobre peso de ligante (Yeh et al. 2005; Nien et al., 2008).

Estabilidad al almacenamiento

Por último, en relación a la estabilidad al almacenamiento de los betunes modificados con polipropileno, nos encontramos de nuevo con la dificultad de obtener betunes estables cuando

se emplean poliolefinas como modificador (Giavarini et al., 1996; Yeh et al., 2005; Casey et al., 2008).

Pese a ello, sí se encuentran en la bibliografía experiencias de betunes estables, pero siempre usando aditivos, lo que limita de manera importante la aplicabilidad de este tipo de polímero al aumentar el coste final. En este sentido, Giavarini et al. (1996), obtuvieron betunes estables empleando un 3% de ácido polifosfórico (PPA) en betunes modificados con contenidos entre el 2 y el 7% de PP. El empleo de anhídrido maleico (MA) (Yeh et al., 2005; Ahmedzade et al., 2015) o el tratamiento térmico del polipropileno mediante pirolisis (Al-Hadidy & Yi-qiu, 2007; Al-Hadidy & Yi-Qiu, 2009) son otras opciones comunes para mejorar la estabilidad de los betunes modificados con este plastómero.

2.3.6 Empleo de Cloruro de polivinilo (PVC) reciclado

2.3.6.1 Características

El cloruro de polivinilo, más comúnmente conocido por sus siglas en inglés: PVC, es un polímero de tipo termoplástico que también ha sido empleado como material reciclado en mezclas bituminosas. Entre las ventajas del empleo de PVC como modificador, se encuentra que este polímero es el que permite, dentro de los plastómeros, alcanzar una menor susceptibilidad a la fisuración a bajas temperaturas (a través de una menor reducción de la ductilidad).



Figura 36. Polímero termoplástico de tipo cloruro de polivinilo (PVC).

No obstante, su interacción con el ligante también es la peor llegando en muchos casos a actuar más como un filler dentro de este que como un elemento integrado (Kalantar et al., 2012). A esto hay que sumar el hecho de que, tal y como pasaba con el PET, el punto de fusión de este polímero es muy elevado (alrededor de 298 °C) y el calentamiento del material a dichas temperaturas puede generar gases nocivos (Behl, Sharma, & Kumar, 2014; Cuadri & Martín-Alfonso, 2017). Todo esto ha conducido a muchos autores a descartar su empleo (Casey et al.,

2008; Dalhat & Wahhab, 2015; Al-Abdul Wahhab et al., 2017) o a considerar el uso de este polímero por vía seca.

2.3.6.2 Disponibilidad

Desde el punto de vista de su disponibilidad, el PVC es uno de los plastómeros cuyo empleo está más extendido en la actualidad. Este polímero representa el 10.2% del total de la producción a nivel europeo y se utiliza en la fabricación de marcos de ventanas, tuberías, perfiles, aislamientos de cables eléctricos, mangueras, etc. (Plastics Europe. Association of Plastics Manufactures, 2018). Existen en la bibliografía diversos estudios que han utilizado PVC reciclado de distinto origen como modificador, ya sea procedente de tuberías (Abdel-Goad, 2006; Behl et al., 2014), marcos de ventanas o cables (Köfteci, Ahmedzade, & Kultayev, 2014) o del reciclaje de otros elementos (Rahman, Ahmeduzzaman, Sobhan, & Ahmed, 2013).



Figura 37. Ejemplos de fuentes de PVC reciclado.

2.3.6.3 Aplicabilidad dentro de mezclas bituminosas

Vía seca

Tal y como se refería, el elevado punto de fusión de este tipo de polímero hace que su empleo como árido sea más indicado que su uso como modificador de ligante. En este sentido, Ergun, Iyınam, & Iyınam (2005) o Quintana, Lizcano, & Martínez (2008), emplearon PVC reciclado en contenidos entre el 2 y el 6% por peso de mezcla, encontrando mejoras tales como una mayor flexibilidad de la mezcla, mayor estabilidad Marshall y mayor resistencia a la deformación permanente.

Vía húmeda

Condiciones de incorporación

Pese al elevado punto de fusión del polímero, otros autores (Abd-Allah, El-Sharkawi Attia, Abd-Elmaksoud Khamis, & Deef-Allah, 2014; Fang, Liu, Yu, Liu, & Lei, 2014) han apostado por la modificación de betunes usando este material estableciendo para ello temperaturas de

mezclado altas, entre 160 y 190°C (aunque hay experiencias con temperaturas menores que no han arrojado buenos resultados), así como elevadas las velocidades de agitación. Para dicho rango de temperatura, el polímero no es capaz de reblandecerse lo suficiente para permitir una buena interacción con el betún. Por este motivo, el polímero permanece más como un filler dentro de la matriz del ligante. Dentro de los procesos de modificación revisados en la literatura los tiempos de mezclado oscilan entre los 20 y los 180 minutos (Brasileiro et al., 2019).

Considerando que el polímero permanece como partícula sólida, los estudios que hacen uso de este plastómero suelen someterlo previamente a tratamientos de lavado, machacado y trituración (Abdel-Goad, 2006; Rahman et al., 2013) para procurar que las partículas añadidas sean del menor tamaño posible y limitar así el problema de integración con el betún (Behl et al., 2014; Köfteci et al., 2014). Dentro de los porcentajes de adición de este material se encuentran estudios que incorporan desde un 1% a un 20% por peso de betún, aunque el porcentaje más común se sitúa en el 5% de PVC (Figura 32).

Características de los betunes modificados

Variación de propiedades básicas

- Penetración y temperatura de reblandecimiento

En cuanto a las variaciones de las propiedades básicas del ligante tras la incorporación del polímero, de nuevo encontramos un aumento de la penetración y una reducción de la temperatura de reblandecimiento proporcional al contenido de plastómero. En este caso, y para el contenido de PVC más común (5% por peso de ligante), se obtienen unas reducciones promedio de la penetración de un 37% y un aumento del punto de reblandecimiento del 16 % (Brasileiro et al., 2019). En este caso, y al contrario de lo que ocurría con las poliolefinas, la mayor variación de la penetración se encontró para un betún base con un alto grado de penetración (Köfteci et al., 2014) correspondiendo a este betún también el mayor incremento de temperatura de reblandecimiento.

- Viscosidad

El aumento de viscosidad registrado con la adición de este polímero es considerablemente alto, hasta un 300% al añadir un 5% de PVC (Behl et al., 2014; Köfteci et al., 2014). Esto está motivado por la presencia de partículas de polímero menos integradas y las mayores temperaturas necesarias para su mezclado. No obstante, los valores obtenidos no sobrepasan el límite de 3.0 Pa.s at 135 °C propuesto por el SHRP.

- Ductilidad

De manera opuesta a lo observado para la viscosidad, este plastómero es el que se ve menos afectado en términos de ductilidad ya que, aunque esta disminuye, lo hace en menor proporción que para otras tipologías (Rahman et al., 2013; Fang et al., 2014).

Variación de comportamiento reológico

En términos de reología, al igual que en el resto de plastómeros, la adición de este polímero da lugar a betunes más rígidos y de comportamiento más elástico como se puede comprobar por los incrementos del valor del módulo complejo de rigidez (G^*) y disminuciones del ángulo de fase, los cuales son más pronunciados a medida que el contenido de PVC es mayor.

Por otra parte, en la Figura 38 se puede comprobar cómo el betún base también influirá en los cambios observados (encontrando más variación para betunes de penetración más alta). De igual modo, existirá variación atendiendo al tipo de residuo del cual proceda el PVC, ya que esto influirá en su naturaleza y tratamiento (Behl et al., 2014; Köfteci et al., 2014). Por este motivo, es necesario un estudio reológico del betún base y de los potenciales residuos para determinar de manera clara los efectos del PVC escogido.

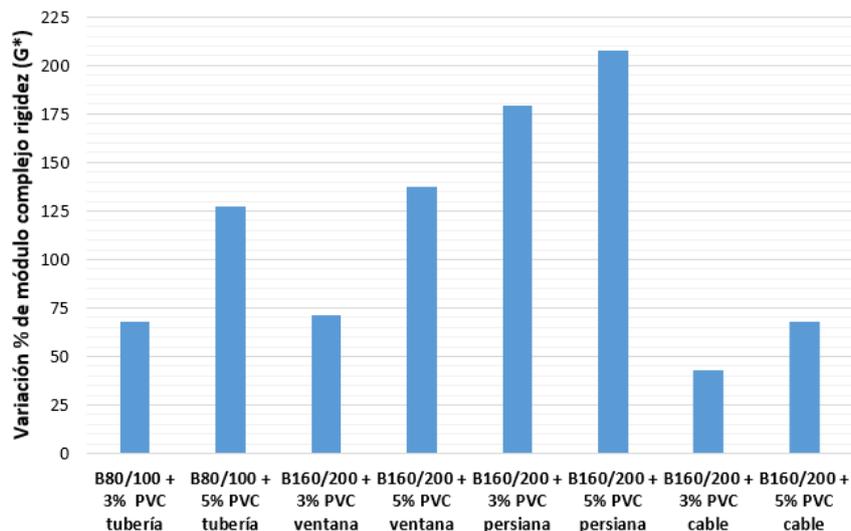


Figura 38. Variación módulo complejo de rigidez (G^*) respecto del betún base para PVC reciclados de distinto origen (Behl et al., 2014; Köfteci et al., 2014).

Estabilidad al almacenamiento

Finalmente, en relación a la estabilidad al almacenamiento, existen estudios que han logrado obtener betunes estables añadiendo hasta un 5% de PVC al betún (Rahman et al., 2013; Fang et

al., 2014). Existen otras experiencias añadiendo aditivos para mejorar la dispersión del polímero y la estabilidad del betún resultante como las de Behl et al. (2014) o Fang et al. (2014). Este último, emplea como estabilizador organo montmorillonita (OMMT) añadida en un 5% por peso de betún.

2.3.7 Empleo de Etilvinilacetato (EVA) reciclado

2.3.7.1 Características

El etilvinilacetato (comúnmente conocido como goma EVA) es un polímero termoplástico (plastómero) obtenido mediante la copolimerización del etileno y el vinil acetato (VA). El punto de fusión de este polímero es considerablemente bajo y oscila entre 54°C y 110°C (existiendo variaciones en función del contenido de vinil-acetato) (Haddadi, Ghorbel, & Laradi, 2008; Luo & Chen, 2011; El-Rahman, El-Shafie, Mohammedy, & Abo-Shanab, 2017).



Figura 39. Polímero termoplástico de tipo etil-vinil-acetato (EVA).

El resultado obtenido tras su incorporación, la cual se suele realizar siempre por vía húmeda, depende en buena medida de los porcentajes de vinil acetato incluidos en su composición. Dicho contenido es controlado durante el proceso de copolimerización (Stark & Jaunich, 2011). El segmento correspondiente al etileno es no polar y cristalino mientras que el segmento de vinil-acetato si presenta polaridad, pero no es cristalino (Alataş & Yilmaz, 2013).

Considerando esto, la variación del contenido de vinil-acetato (VA) puede servir para controlar las propiedades finales del betún modificado al que se incorpora el EVA:

- Bajos contenidos de VA darán lugar a un alto grado de cristalización, lo cual se traducirá en una mayor rigidez y mejor comportamiento a altas temperaturas del ligante resultante.
- Un contenido alto de VA dará lugar a una cristalización mucho menor, disminuyendo la rigidez del betún modificado, pero mejorando su flexibilidad, elasticidad y estabilidad al almacenamiento (Liang, M. et al., 2017).

La posibilidad de variar las propiedades del EVA modificando su contenido de vinil-acetato lo convierte en un material muy versátil dentro de la modificación comercial (es uno de los polímeros más empleados por detrás de los de tipo SBS) (Polacco et al., 2015) pero también hace que sea un material algo menos homogéneo cuando su origen es reciclado.

2.3.7.2 Disponibilidad

Este polímero suele estar presente en juguetes, calzado, herramientas del hogar y como material para superficies y materiales deportivos o de recreo (El-Rahman et al., 2017). Sin embargo, su disponibilidad como material reciclado es mucho más limitada si comparamos con otros plastómeros como el polietileno (PE) o el polipropileno (PP), (< 6% de la producción de material reciclado en Europa en 2018, (Plastics Europe. Association of Plastics Manufactures, 2018)) lo que limita, en cierto modo, su potencial utilización como material reciclado.



Figura 40. Ejemplo de objetos que emplean EVA.

2.3.7.3 Aplicabilidad dentro de mezclas bituminosas

Vía húmeda

El bajo punto de fusión de este tipo de polímero hace que su empleo en mezclas bituminosas sea mayoritariamente como modificador del betún. Existen estudios que consideran que este plastómero es uno de los que, dentro de las limitaciones comunes a todas las tipologías, presenta una mayor compatibilidad y, hasta cierto punto, un grado de reblandecimiento y recuperación elástica algo mayor, aunque aún muy lejos de la alcanzada por los elastómeros (Sureshkumar et al., 2010).

Aparte de esto, mantiene un comportamiento térmicamente estable a las temperaturas de mezclado y compactación habituales, no introduce un elevado aumento de la viscosidad y, al igual que el polietileno (PE), su coste es reducido (Kalantar et al., 2012).

Condiciones de incorporación

La variabilidad en la composición de este polímero también da lugar a variaciones significativas dentro de las condiciones de mezclado encontradas en la literatura. De esta forma, existen variaciones de temperatura entre 150 °C y 190 °C, tiempos de mezclado que oscilan entre 20 y 240 minutos y velocidades de mezclado en un rango entre 300 y 7200 rpm (Brasileiro et al., 2019).

En relación al porcentaje de EVA incorporado, este oscila entre el 1 y el 8% por peso de betún siendo el porcentaje más empleado el 5% (Figura 32). Atendiendo al contenido de vinil-acetato (VA), el porcentaje más empleado dentro de la modificación de ligantes es del 18% (Yuliestyan, Cuadri, García-Morales, & Partal, 2016; Liang, M. et al., 2017; Liu et al., 2017).

Características de los betunes modificados

Variación de propiedades básicas

- Penetración

La adición de este polímero en su contenido más común, el 5% por peso de ligante, supone unas reducciones medias en torno al 40% del valor de penetración original. En este caso, no existe una gran diferencia entre las penetraciones del betún base que mayor variación presentó tras la adición de EVA (75 dmm, (Costa et al., 2017)) y la que mostró una menor reducción de este parámetro (82 dmm, (Saboo & Kumar, 2015)). A tenor de esto, y para este tipo de polímero, se puede deducir que las variaciones en la composición del mismo (a través del contenido de VA) y las condiciones de mezclado ejercen una mayor influencia en los resultados obtenidos que el betún base escogido.

- Temperatura de reblandecimiento

En cuanto a las variaciones de punto de reblandecimiento, al igual que ocurría con la penetración, estas se hacen más marcadas al aumentar el contenido de polímero. De igual modo, de manera similar al resto de plastómeros, dichas variaciones resultan de menor proporción que en el caso de la penetración. Se encuentran así, para un 5% de EVA por peso de ligante, incrementos de la temperatura de reblandecimiento alrededor del 33% (Brasileiro et al., 2019).

De nuevo aquí, el empleo de anhídrido maleico (MA) (injertado en el polímero como estabilizador), consigue elevar aún más el punto de reblandecimiento, llegando a incrementos de hasta el 53% (Luo & Chen, 2011).

- Viscosidad

Al igual que ocurre con el resto de polímeros, la viscosidad del betún modificado resultante se incrementa tras la adición de EVA de manera proporcional al contenido incorporado (Alataş & Yilmaz, 2013; Yuliestyan et al., 2016; Liu et al., 2017).

- Ductilidad

Al contrario que el resto de plastómeros, la adición de este polímero es capaz de aumentar la ductilidad del betún resultante. El empleo de EVA en un 5% por peso de ligante, ha demostrado ser capaz de incrementar la ductilidad del betún hasta en un 20% pudiendo llegar a valores de hasta un 140% si este además dicho polímero está injertado con anhídrido maleico (MA) en un 2% (Luo & Chen, 2011).

Variación de comportamiento reológico

En cuanto a las propiedades reológicas básicas, al igual que el resto de plastómeros, la adición de este polímero da lugar a aumentos del módulo complejo de rigidez (G^*), y un comportamiento menos viscoso del ligante a través de una reducción del ángulo de fase. No obstante, y pese a presentar en términos generales una mayor recuperación elástica que el resto de plastómeros, su comportamiento a altas temperaturas no sobrepasa el de otros plastómeros como el polietileno (PE) y no alcanza las propiedades de otros betunes modificados con elastómeros (Lastra-González, Calzada-Pérez, Castro-Fresno, Vega-Zamanillo, & Indacochea-Vega, 2016; Costa, Fernandes, Silva, & Oliveira, 2017).

Dentro de las variaciones de composición del polímero, a mayor porcentaje de vinil-acetato dentro del EVA, mayor será el valor de módulo complejo obtenido, alcanzándose los valores más altos para un contenido de VA del 18% (Liang, M. et al., 2017).

Estabilidad al almacenamiento

Finalmente, son varios los estudios (Luo & Chen, 2011; Saboo & Kumar, 2015) que han logrado obtener betunes modificados estables mediante la adición de 5% de EVA. Dentro de un mismo contenido de EVA, a medida que el contenido de vinil-acetato se incrementa, mayor es también la estabilidad obtenida (Liang, M. et al., 2017).

Los aditivos estabilizadores más comunes para este polímero son el anhídrido maleico (MA) (Luo & Chen, 2011), y algunos tipos de nano-arcillas (Sureshkumar et al., 2010). Tal y como se ha

referido, la adición de anhídrido maleico reduce la penetración, incrementa la ductilidad y temperatura de reblandecimiento del betún y mejora la estabilidad del mismo. Por otro lado, el empleo de nano-arcillas permite incrementar el contenido de EVA empleado, como en el estudio de Sureshkumar et al. (2010), para el cual se logró incrementar dicho contenido hasta un 6% por peso de ligante.

2.3.8 Empleo de Polvo de neumático al fin de su vida útil (PNFVU)

2.3.8.1 Características

Los neumáticos presentes en la mayoría de vehículos son una notable fuente de polímeros disponible para el reciclaje ya que se componen mayoritariamente de caucho. Este material supone en torno a un 40 - 45 % del total, correspondiendo el resto a negro de carbón (entre un 20% y un 28 %, en función del tipo de neumático), aditivos (un 10%), textil y metal. El caucho presente en los neumáticos puede tener tanto un origen natural, como proceder de materiales sintéticos como el caucho estireno butadieno (SBR, según sus siglas en inglés), caucho butadieno (BR) o el caucho monómero etileno-propileno-dieno (EPDMR, según sus siglas inglesas). Todos estos componentes son sujetos a un proceso de vulcanización conjunta para dotar al neumático de unas propiedades específicas (Ramarad et al., 2015). La vulcanización se define como el proceso de entrelazamiento entre el caucho y el resto de componentes mediante la adición de azufre o compuestos que lo incorporan.

A la hora de emplear este material, y en especial cuando se desea incorporar como parte de materiales bituminosos, los neumáticos deben ser previamente triturados para obtener partículas de menor tamaño (Figura 41). Para ello existen distintos métodos:

- El proceso puede ser en primer lugar realizado a temperatura ambiente, pudiendo obtenerse así partículas de hasta 0.3 mm, rugosas e irregulares, pero con una elevada superficie específica, lo cual ayuda a la modificación. Debido a esto y su mayor disponibilidad en el mercado, este método de trituración es el más recomendable. Dentro de este existen dos subtipos:
 - Las variantes en seco, que requiere un exhaustivo control de la temperatura para prevenir la oxidación y combustión del material
 - En húmedo, el cual permite un tamaño menor (hasta 10 micras), pero requiere de pasos previos de trituración y posterior secado.
- Trituración criogénica, que usa nitrógeno líquido para después triturar el neumático. Con este método se pueden conseguir partículas de tamaño reducido (hasta 75 micras)

y de mayor limpieza, pero el coste también resulta más elevado (Amari, Themelis, & Wernick, 1999).

En cualquiera de los métodos mencionados, la parte textil y metálica del neumático se elimina mediante separadores neumáticos y electromagnéticos respectivamente.



Figura 41. Trituradora de neumáticos para su reutilización.

Este material es uno de los polímeros reciclados de carácter elastomérico con mayor tradición de empleo en el ámbito de los materiales bituminosos. Actualmente, en el mercado es posible encontrar betunes modificados en refinería que incorporan dicho material e incluso normativas como la española, incluye en su Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes (Dirección General de Carreteras. Ministerio de Fomento, 2015) la priorización del producto resultante de la trituración de los neumáticos usados.

2.3.8.2 Disponibilidad

La tendencia al alza en el número de vehículos que circulan por carretera - 328 millones de vehículos en Europa en 2016, con una tasa anual de crecimiento del 0.8%- trae consigo un considerable aumento en el número de neumáticos necesarios. Siguiendo esta tendencia, la producción también sigue creciendo, con unos 4.9 millones de toneladas de neumáticos producidos en Europa en 2016 (European Tyre & Rubber Manufacturers Association, 2017). Como consecuencia de ello, también se incrementa el número de neumáticos que alcanzan el final de su vida útil.

Aproximadamente 800 millones de neumáticos son desechados cada año y esta cifra aumenta en torno a un 2% de manera anual (Van Beukering & Janssen, 2001; Sienkiewicz, Kucinska-Lipka, Janik, & Balas, 2012). La primera forma de desechar los neumáticos usados fue su disposición

en vertederos, no obstante, este método trae consigo diversos problemas ambientales y no permite volver a recuperar el valor del material. La forma e impermeabilidad de los neumáticos favorece, además, la acumulación de agua durante mucho tiempo, sirviendo de criadero para diversas tipologías de insectos transmisores de enfermedades (Adhikari, De, & Maiti, 2000; Ferrão, Ribeiro, & Silva, 2008; Fiksel, Bakshi, Baral, Guerra, & DeQuervain, 2011). Aparte de esto, las altas temperaturas alcanzadas en verano hacen que los neumáticos usados supongan un riesgo de incendio elevado. Dichos incendios, además, son difíciles de extinguir debido al elevado espacio que queda entre unos neumáticos y otros que dificultan el acceso del agua o la extinción a través del corte del suministro de oxígeno a la combustión. Por otra parte, la combustión de los distintos componentes presentes en los neumáticos genera una considerable contaminación del substrato, las aguas subterráneas y del aire, generando un espeso humo negro que reduce la visibilidad y arroja a la atmósfera nocivos gases tóxicos (Jang, Yoo, Oh, & Iwasaki, 1998).



Figura 42. Vertedero de neumáticos en A Laracha (Galicia)

Como alternativa a la disposición en vertederos y con la mejora en la eficiencia de los modelos de recuperación, surgieron distintas opciones para aprovechar los materiales presentes en los neumáticos para dotarlos de una segunda vida. La Figura 43 muestra la evolución en Europa de estas opciones, tendencia que es similar en el resto del mundo. En ella, se puede apreciar notable descenso de la cantidad de neumáticos que acaban en vertederos desde 2005 y cómo, actualmente, el empleo de los neumáticos como forma de obtener energía (28 %) y el reciclaje de los mismos (46 %) son las dos principales formas de reutilización de este material. Junto a estas otras como la sustitución de las capas dañadas de neumáticos por otras nuevas (“Retreading”) o el empleo de los mismos con otros fines.

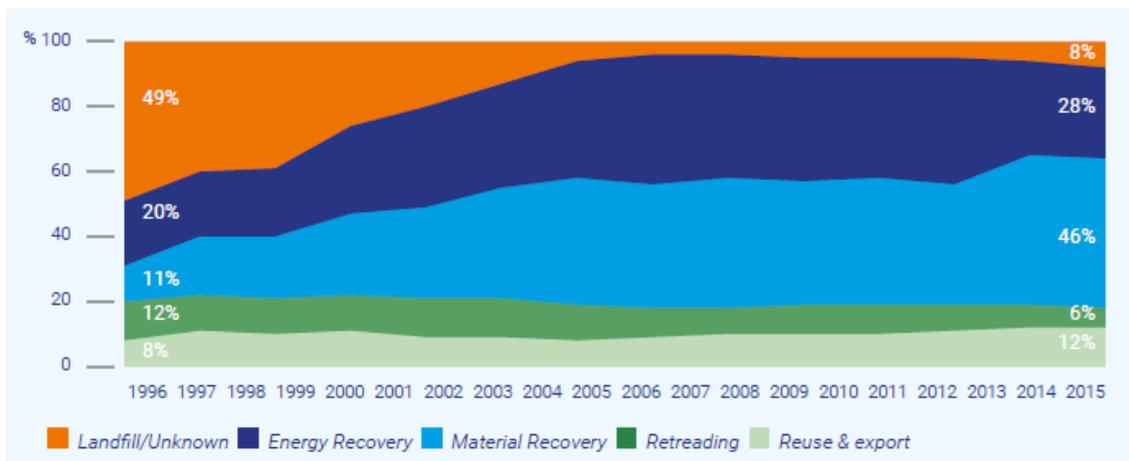


Figura 43. Evolución de los tratamientos de neumático al final de su vida útil entre 1996-2015 (European Tyre & Rubber Manufacturers Association, 2017).

Desde el punto de vista energético, la industria del cemento es la principal consumidora de neumáticos completos o triturados como combustible para sus hornos, donde las altas temperaturas aseguran la completa combustión de sus componentes (Ramarad et al., 2015). Este método tiene menos emisiones que el uso del carbón y permite incorporar los restos metálicos y cenizas generadas al clinker. Pese a estas ventajas, únicamente entre un 30-38% de la energía necesaria para producir un neumático es recuperada por este sistema (Ferrão, Ribeiro, & Silva, 2008), por lo que la opción de la recuperación de material mediante reciclaje es más atractiva.

El reciclado de neumáticos va desde su empleo como conjunto para su uso en arrecifes artificiales, juegos infantiles, control de la erosión, barrera contra choques en carreteras, rompeolas y dispositivos de flotación (Clark, Meardon, & Russell, 1993; Presti, 2013), a su utilización tras trituración para ser incorporado como caucho. Este es empleado por la industria plástica en la formación de materiales para pistas deportivas o zonas de recreo para niños y, lo que resulta más importante desde el enfoque de esta tesis doctoral, como modificador polimérico en materiales bituminosos.

2.3.8.3 Aplicabilidad dentro de mezclas bituminosas

Vía seca

Aunque la modificación con caucho por vía seca tiene efectos adicionales positivos como la reducción del nivel de ruido (Huang & Pauli, 2008), el sistema de modificación por vía húmeda es generalmente preferido. Esto se debe en primer lugar, a que de manera general, en vía seca es necesario emplear un mayor contenido de polvo de caucho para obtener las mismas

propiedades que se obtendrían por vía húmeda (Colucci, Colucci, Prieto, & Dayton, 1994), así como un mayor contenido de betún para garantizar la integración del mismo.

La otra principal razón se relaciona con la dificultad de obtener una interacción adecuada entre el betún y el caucho cuando estos son mezclados junto con los áridos, haciendo necesaria una especial atención a las temperaturas y tiempos de mezclado entre los distintos componentes. Esto ocurre especialmente a partir de contenidos de caucho por encima del 5% sobre el peso de mezcla, donde es posible encontrar aglomeraciones de partículas de caucho entre sí, es necesario el empleo de un mayor contenido de ligante para cubrir el caucho y se produce una falta de adhesividad entre estos dos materiales (Hunter et al., 2015).

Cuando se emplea caucho por vía seca, los porcentajes oscilan entre el 1 y el 10% con respecto al peso total de mezcla (siendo más comunes los porcentajes cercanos al 1%). En este caso, el tamaño de partículas suele ser algo mayor que el empleado en vía húmeda y se sitúa entre 0.6 mm y 3mm.

Vía húmeda

Condiciones de incorporación

Cuando el caucho procedente de neumáticos es empleado como modificador del ligante (vía húmeda), es frecuente el empleo de los tamaños menores, entre 0.15 mm y 0.6 mm (Figura 44, a la derecha) obtenidos mediante el proceso de trituración. Según el Manual de Empleo del Caucho en Mezclas Bituminosas del CEDEX (2007), el contenido de partículas finas menores de 0.063 mm debe ser menor al 15 % y se fijan unos límites de contaminación máxima ferromagnética, textil o de otro tipo del 0.01 %, 0.5 % y 0.25 % respectivamente.



Figura 44. Caucho procedente de la trituración de neumáticos en distintos tamaños.

El empleo de este material oscila en porcentajes que van desde un 2 % a un 15% sobre el peso total de betún. No obstante, existen ligante que emplean una concentración superior aún (por encima del 20 %), para los cuales la propia red física creada por el elevado contenido de polímero

previene, en cierto modo, la sedimentación del mismo (Figura 32) (Moreno-Navarro, Sol-Sánchez, Rubio-Gámez, & Segarra-Martínez, 2014; Hunter, Self, Read, & Hobson, 2015; Shen, Li, & Xie, 2017).

Dentro de la modificación por vía húmeda, la reacción con el betún se compone de dos procesos simultáneos: por un lado, la digestión parcial del caucho en el betún y, por otro, la absorción de los aceites aromáticos del mismo dentro de las cadenas poliméricas del caucho causando que, este último, se reblandezca y se hinche (Chehovits, Dunning, & Morris, 1982; Lee, Akisetty, & Amirhanian, 2008; Celauro, Celauro, Presti, & Bevilacqua, 2012; del Barco-Carrión, García-Travé, Moreno-Navarro, Martínez-Montes, & Rubio-Gámez, 2016). De esta forma, alrededor de la partícula de caucho se genera, por efecto de la agitación, una capa en forma de “gel” que, a medida que se continua el mezclado, se va integrando con el betún. Si el proceso de modificación se continuase en el tiempo, se llegaría al punto en el que las partículas de caucho llegarían a desaparecer asimiladas totalmente por el betún.

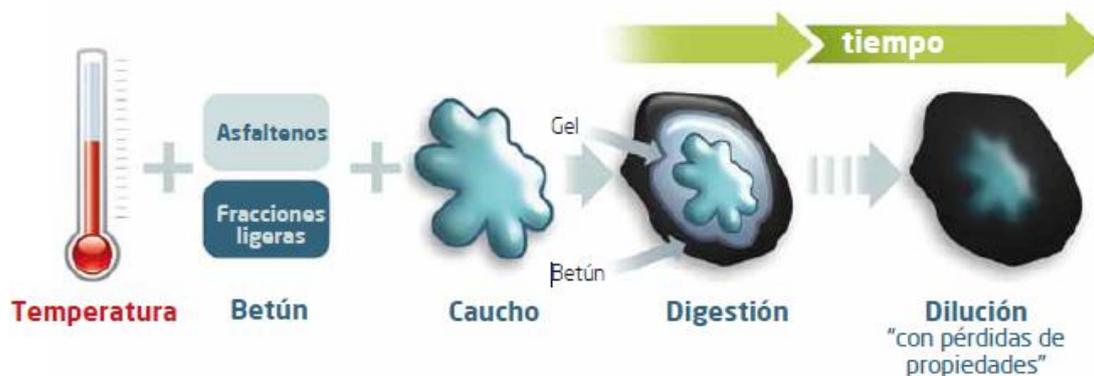


Figura 45. Esquema del proceso de interacción entre caucho y betún (Bermejo-Muñoz et al., 2014).

Precisamente por ello, las condiciones de mezclado son, en este caso, especialmente importantes. En este sentido, el proceso de digestión se ve favorecido por el aumento de la temperatura (la intensidad de interacción se duplica por cada 10 °C de temperatura (Bermejo-Muñoz et al., 2014)), del tiempo de mezclado, de la energía de mezclado, del contenido de fracciones ligeras del betún (aunque en menor proporción que la elección de la penetración del betún base) o al disminuir el tamaño de las partículas de caucho.

Junto a esto, hay que considerar que tiempos de mezclado o temperaturas excesivamente altas pueden dar lugar -aparte del consabido deterioro del ligante por procesos de oxidación, común al resto de polímeros- a una excesiva degradación o aglomeración del caucho que afecta a las propiedades del betún resultante (Presti, 2013; Li, Ding, Zou, & Sun, 2017) (Figura 46). Dentro

de la bibliografía se encuentran variaciones de la temperatura de mezclado entre 145 y 195 °C, tiempos de mezclado entre 20 y 180 minutos y velocidades que van desde 200 rpm a 7200 rpm en función del sistema de agitación empleado (Brasileiro et al., 2019).

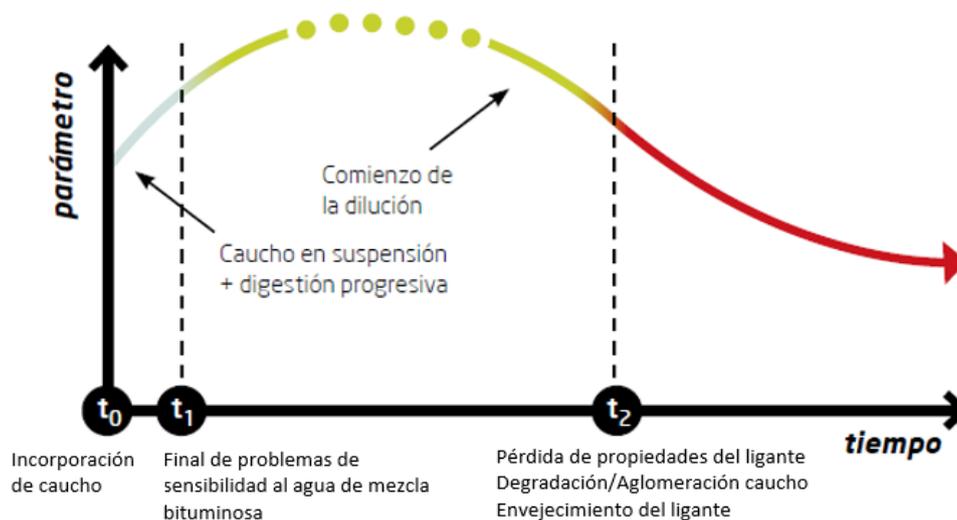


Figura 46. Evolución de las características de los betunes modificados con caucho en función del tiempo de mezclado.

Características de los betunes modificados

Variación de propiedades básicas

- Penetración y temperatura de reblandecimiento

Entrando ya en lo referente a las propiedades mecánicas de los ligantes modificados con PNFVU, dentro de la bibliografía es posible encontrar reducciones de penetración del orden del 22.5 % y aumentos de la temperatura de reblandecimiento en torno al 14.5 % (Brasileiro et al., 2019) cuando se añade un 10% de PNFVU por peso de betún (el porcentaje de modificación más común por vía húmeda) (Nejad, Aghajani, Modarres, & Firoozifar, 2012, Yan et al., 2015).

- Viscosidad

Otro aspecto importante es el aumento de viscosidad que supone la adición de este material, la cual y pese a ser mayor que en el caso de los plastómeros y emplearse en mayores proporciones, no alcanza el límite de 3 Pa.s planteado por el SHRP (Navarro, Partal, Martinez-Boza, & Gallegos, 2005; Xu, Xiao, Han, Amirkhanian, & Wang, 2016; Diab & You, 2017). No obstante, el empleo de caucho en altos porcentajes (en torno al 20%) sí es susceptible de sobrepasar dicho límite (Nejad et al., 2012).

- Ductilidad

Por otra parte, la adición de 10% de PNFVU trae consigo, tal y como sucedía con los plastómeros, una importante reducción de la ductilidad (hasta el 90%) a 15 °C (Yan et al., 2015; Ge et al., 2016). Pese al efecto adverso que, como ya se ha comentado, esto puede tener en relación al riesgo de fisuración a bajas temperaturas, en este caso y a diferencia de los plastómeros, el empleo del caucho también mejora notablemente la recuperación elástica del material lo que mejora el comportamiento a fatiga y reduce dicho riesgo de fisuración (Kalantar et al., 2011).

Variación de comportamiento reológico

En cuanto a la variación de las propiedades reológicas, en este caso, aunque aún se aprecia el incremento de módulo de rigidez complejo a altas temperaturas, existe un cierto descenso del mismo a las temperaturas más bajas. Esto se traduce en un comportamiento menos rígido a dichas temperaturas que, sumado al descenso del ángulo de fase y la mayor recuperación elástica obtenida mediante su adición, hace que el riesgo de fisuración a bajas temperaturas se reduzca (Kök & Çolak, 2011; Cong, Xun, Xing, & Chen, 2013; Xie & Shen, 2014; Ding, Ma, Zhang, & Zhang, 2017).

Estabilidad al almacenamiento

En relación a la estabilidad al almacenamiento de los betunes modificados con caucho, aunque existen algunos autores que hablan de la obtención de betunes estables sin necesidad de aditivos hasta contenidos por encima del 20 % (Ding et al., 2017, Nejad et al., 2012), en términos generales, es habitual encontrar betunes que incluso para contenidos menores (entre el 8 % y el 15 %) presentan problemas de separación de fases a altas temperaturas (Han, Zheng, & Wang, 2016, Xu et al., 2016)

El alto peso molecular del caucho y la dificultad de interacción entre este y el betún suelen ser los motivos que ocasionan la precipitación del caucho. Para evitar la necesidad de métodos de agitación dentro de los tanques en las plantas o tener que modificar los betunes de manera inmediatamente previa a su empleo, se han estudiado distintos modos de mejorar los sistemas que incorporan caucho.

Dentro de estas soluciones, la más sencilla y que menor repercusión tiene en el coste final del material es la reducción del tamaño de las partículas. En este sentido, Navarro et al. (2005) propone el empleo de partículas menores a 0.35 mm y procesos de mezclado a alta velocidad.

Autores como Sienkiewicz et al. (2017) han logrado de manera similar obtener betunes estables para contenidos entre 5-10 %.

Sin embargo, otros autores han apostado por el empleo de aditivos o la aplicación de algún pretratamiento al polímero (como la desvulcanización del mismo) para lograr betunes estables incorporando entre un 8 y 15% de PNFVU (Yan, He, Chen, & Liu, 2016 Xu et al., 2016, Han et al., 2017). Entre los compatibilizadores habituales, se encuentran compuestos como el TOR (transpolioctenamer) (Xie & Shen, 2014; Shen et al., 2017) o nano sílices (Han et al., 2017).

2.3.9 Empleo de combinaciones de polímeros reciclados

Una vez que referidas en los apartados anteriores las características de los distintos polímeros reciclados empleados en la modificación de materiales bituminosos, es posible apreciar cómo cada uno de ellos tienen determinadas ventajas e inconvenientes. Como resultado de esto, y con el objetivo de lograr una modificación que permita obtener las mejores propiedades posibles y maximice las ventajas del empleo de materiales reciclados (desde el punto de vista ambiental y económico), muchos autores han planteado el uso conjunto de distintas tipologías. En este sentido, diversos estudios han analizado la posibilidad de combinar distintos tipos de polímeros (principalmente de distinta naturaleza, como plastómeros y elastómeros) para lograr un comportamiento que no es posible lograr por separado (Yan et al., 2015; Ge et al., 2016; Zhang & Hu, 2016).

A la hora de realizar la combinación de distintos polímeros, estos pueden ser previamente extruidos (Brovelli, Crispino, Pais, & Pereira, 2015; Garcia-Morales, Partal, Navarro, & Gallegos, 2006; Karahrodi, Jazani, Paran, Formela, & Saeb, 2017) o simplemente ser añadidos al betún base cada uno en la proporción fijada para mezclarlos después (Yan et al., 2015; Gibreil & Feng, 2017). El proceso de extrusión previo puede ayudar a una mejor integración de los polímeros entre sí que facilite la posterior relación con el betún durante el mezclado. No obstante, la necesidad de un proceso adicional encarece el coste final del ligante y limita su aplicabilidad.

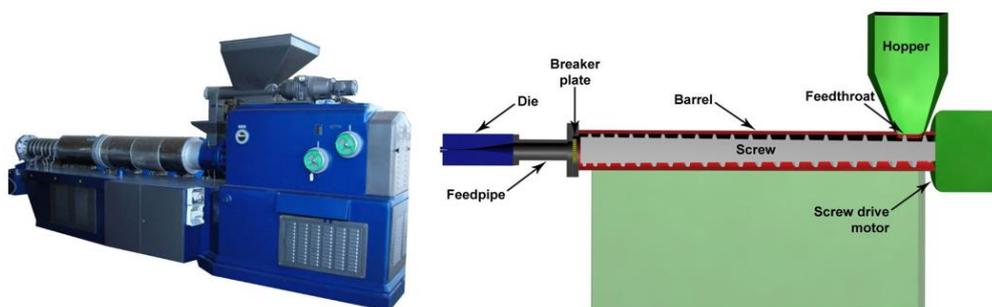


Figura 47. Extrusor de polímeros y esquema de funcionamiento.

2.3.9.1 Aplicabilidad dentro de mezclas bituminosas

Entre las distintas combinaciones presentes en la literatura, las más comunes son las mezclas de un determinado plastómero con un elastómero (ya sea sintético o algún tipo de caucho): PNFVU + PE (Navarro, Partal, Martínez-Boza, & Gallegos, 2010; Zhang and Hu, 2016; Ge et al 2016; Farahani, Palassi, & Galooyak, 2018; Zhang et al., 2018), PNFVU + EVA (Fang et al., 2015), GTR+PP (Zhang and Hu, 2016), GTR+PET (Karahrodi et al., 2017) o GTR+EVA+PE (García-Morales et al., 2006). También, y aunque es menos común, también existen experiencias de combinaciones de plastómeros como la de EVA + PE descrita en el estudio de Brovelli et al. (2015). Independientemente del tipo de combinación, esta suele ser incorporada a la mezcla por vía húmeda.

Condiciones de incorporación

Como es de esperar la combinación de distintos polímeros, de distinta naturaleza y en distintos porcentajes, da lugar una enorme variabilidad en las condiciones de mezclado de estas combinaciones. De este modo podemos encontrar temperaturas de mezclado que van desde los 120°C hasta los 190 °C, tiempos desde los 30 a los 360 minutos y velocidades desde las 1200 a 25000 rpm (Brasileiro et al., 2019). Este último valor se corresponde a combinaciones de altos contenidos de polímeros y de elevada viscosidad como las del estudio de Yuan et al. 2017, que combina polietileno reciclado en altas tasas (entre el 7 y el 12%) con polímeros comerciales de tipo SBS.

No obstante, el hecho de combinar distintos polímeros suele implicar un contenido global de estos habitualmente mayor y de ahí la necesidad, sobre todo si se intenta evitar un aumento de la temperatura de mezclado para no oxidar el material, de emplear mayores tiempos de mezclado y mayores velocidades. Como ejemplo, combinaciones con plastómeros de tipo EVA o PE puede requerir tiempos de entre 30 y 180 minutos (llegando a 360 si se combinan ambos junto con PNFVU) y velocidades de mezclado entre 1200 y 5000 rpm (García-Morales et al., 2006).

Características de los betunes modificados

Variación de propiedades básicas

- Penetración y temperatura de reblandecimiento

En relación a la variación de las propiedades básicas de los ligantes, la combinación de algún tipo de plastómero (principalmente de tipo poliolefínico) con PNFVU da lugar, en términos generales

y teniendo en cuenta las variaciones producidas por distintos tipos de plastómero, a una reducción de penetración y un aumento en el punto de reblandecimiento. Estas se sitúan en términos intermedios entre las que encontraríamos para el uso del porcentaje óptimo de plastómero y la que se daría para el uso exclusivo de un contenido habitual de PNFVU como sería el 10% por peso de ligante (Brasileiro et al., 2019).

- Viscosidad

En lo referente a la viscosidad del ligante, la introducción de una mayor cantidad de polímero (sobre todo cuando esta sobrepasa el 10%) y el hecho de que, tanto los plastómeros como el caucho implican un aumento de esta propiedad, dan a menudo lugar a valores que sobrepasan el criterio de 3.0 Pa.s a 135 °C fijado por el SHRP (Zhang & Hu, 2016; Luo, Zhang, & Cong, 2017). No obstante, otras combinaciones de elastómero-plastómero o plastómero-plastómero no alcanzan este límite (García-Morales, 2006; Wahhab et al., 2017).

Teniendo en cuenta esto, siempre y cuando se empleen combinaciones de distintos polímeros, será necesario optimizar los contenidos de ambos atendiendo no sólo a la estabilidad del sistema resultante y las propiedades mecánicas sino también a la limitación que la viscosidad puede introducir. La adecuada elección del betún base a emplear y la evaluación de la viscosidad, no solo a 135°C sino a la temperatura de fabricación y compactación de la mezcla a la que se incorporará el ligante, son también aspectos importantes a considerar.

- Ductilidad

En relación a la ductilidad, la combinación de plastómeros con elastómeros es una adecuada solución a la excesiva fragilidad a baja temperatura que, en ocasiones, pueden generar los primeros. Combinaciones como las de PNFVU+PE efectivamente reducirán la ductilidad del ligante, sin embargo, la presencia del caucho aumenta la recuperación elástica del mismo reduciendo significativamente el riesgo de fisuración a temperaturas bajas (Yan et al., 2015; Ge et al 2016; Gibreil & Feng, 2017).

Variación de comportamiento reológico

Será en la evaluación reológica de estas combinaciones donde quede de manifiesto de manera más clara las ventajas mecánicas de la combinación de polímeros de distinta naturaleza. La presencia de plastómeros, por un lado, incrementan significativamente la resistencia a las deformaciones permanentes a altas temperaturas, a través de mayores valores de módulo de rigidez complejo y menores ángulos de fase (Gama, Júnior, De Melo, Tomas Jeferson Alves, & Rodrigues, 2016; Yuan et al., 2017). La presencia de caucho, por su parte, se suma a este efecto

y añade al sistema una mayor recuperación elástica y flexibilidad a bajas temperaturas, compensando las principales fallas de los plastómeros (Navarro et al., 2010; Zhang & Hu, 2016).

Estabilidad al almacenamiento

Por último, y en relación a la estabilidad al almacenamiento, este problema se incrementa al combinar distintos polímeros y tener, en términos generales, una mayor cantidad de los mismos. Existen distintos estudios que han logrado sistemas estables, principalmente empleando combinaciones de polímeros comerciales como el SBS con distintos plastómeros (Wahhab et al., 2017; Luo et al., 2017). No obstante, es común entre las combinaciones puras de polímeros reciclados la modificación justo antes del empleo para evitar la aparición de problemas de separación y la necesidad de sistemas de agitación en planta.

Al igual que en el caso de la viscosidad, la consecución de un sistema estable requiere de una cuidadosa selección del betún base, las proporciones de polímero y las condiciones de mezclado, así como de la evaluación posterior para garantizar la estabilidad. Dentro de los estabilizadores empleados en la combinación de polímeros encontramos el anhídrido maleico (MA), el azufre, el ácido polifosfórico (PPA, por sus siglas en inglés) y otros compuestos como el ftalato de dioctilo reactivo (DP, por sus siglas en inglés) y aceite de extracto de furfural (Zhang, Wu, Cao, Zhang, & He, 2013, Gama et al., 2016, Zhang and Hu, 2016).

2.3.10 Análisis comparativo de polímeros reciclados

Tras presentar las características de los distintos polímeros reciclados empleados en la modificación de materiales bituminosos, en este apartado se lleva a cabo una comparativa con el fin de identificar aquellos con mayor potencial para la mejora estructural de mezclas bituminosas.

2.3.10.1 Condiciones de incorporación

En primer lugar, como ya se ha podido observar, los porcentajes de plastómero reciclado empleados se sitúan normalmente en torno al 5% por peso de betún mientras que en el caso del caucho no es extraño encontrar mayores contenidos, siendo el más común el 10%. Por este motivo, y desde el punto de vista del potencial de reciclaje y de las ventajas medioambientales y económicas, este tipo de polímero de tipo elastomérico es uno de los más interesantes. Aunque el empleo de este material es de los más extendidos entre los polímeros reciclados, su combinación con otras tipologías (como plastómeros) es un aspecto en el que aún hay cabida

para la investigación, sobre todo en lo referente a la consecución de una mejor integración con otros polímeros como los de tipo plastómero.

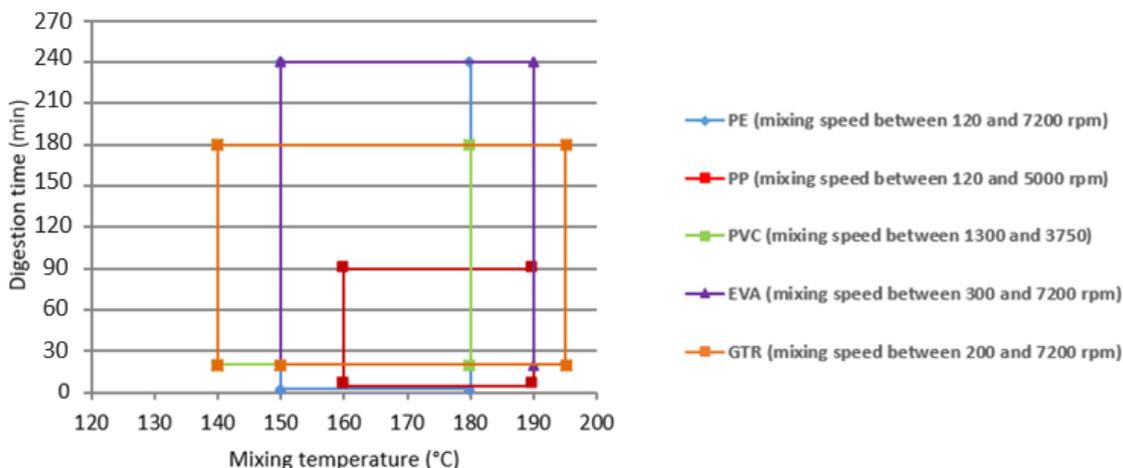


Figura 48. Rangos de variación de temperaturas, tiempos y velocidades de mezclado de polímeros reciclados empleados en la modificación de betunes (Brasileiro et al., 2019).

Cuando se comparan las condiciones de mezclado para la modificación con los distintos polímeros, se puede observar en la Figura 48 que existe una elevada variabilidad en términos de temperaturas, tiempos, métodos de agitación, etc. Por este motivo, aunque es posible establecer recomendaciones acerca de las condiciones en las cuales es posible obtener para un determinado polímero una buena modificación, es tarea casi imposible establecer unas condiciones fijas.

En relación con la temperatura de mezclado y pese a las variaciones, el rango que va desde 160-165 °C es común dentro de los plastómeros. La temperatura más alta dentro de la modificación de estos, 180° C, suele coincidir con las combinaciones de los mismos con PNFVU. No obstante, tanto para el uso exclusivo de estos como para combinaciones, existen experiencias de modificaciones a menor temperatura (dependiendo de los tiempos, tamaño de partículas y sistema de mezclado). De este modo, en términos generales, los elastómeros suelen necesitar mayores temperaturas o, alternativamente, mayores tiempos de mezclado para su modificación.

En relación al tiempo de mezclado, los polímeros que presentan unos periodos más definidos son el polipropileno (PP) y el polvo de neumático (PNFVU). En menor medida, el polietileno presenta unos tiempos de modificación bastante definidos si consideramos que este rango engloba las diferentes tipologías de PE: LDPE, LLDPE y HDPE las cuales, tienen diferentes puntos de fusión. Esta consideración junto al resto de variables (temperaturas, contenido, tamaño, etc.) dan lugar a un rango de tiempos de mezclado más amplio.

Los plastómeros de tipo PVC y EVA presentan un rango más amplio de tiempos de mezclado dentro de la literatura revisada y, para ellos, es más difícil establecer un rango fijo de tiempos de mezclado. Por otra parte, la velocidad de mezclado empleada es un parámetro donde la variabilidad es más elevada, ya que esta depende de un mayor número de variables como el tipo de mezclador (rotatorio de aspas o de cizalla), el betún base, el tratamiento del polímero, etc. siendo así más difícil establecer una correlación clara entre el tipo de polímero y la velocidad necesaria para su modificación.

2.3.10.2 Características de los betunes modificados

Variación de propiedades básicas

- Penetración y temperatura de reblandecimiento

Cuando consideramos las características básicas de los betunes resultantes, en términos generales, se puede observar como la penetración se reduce (Figura 49) y el punto de reblandecimiento aumenta (Figura 50) con la adición de polímeros reciclados. Dentro de los plastómeros, generalmente los cambios son más marcados en el caso de la penetración que en el de la temperatura de reblandecimiento al contrario de lo que ocurre con los elastómeros termoplásticos (Hunter et al., 2015).

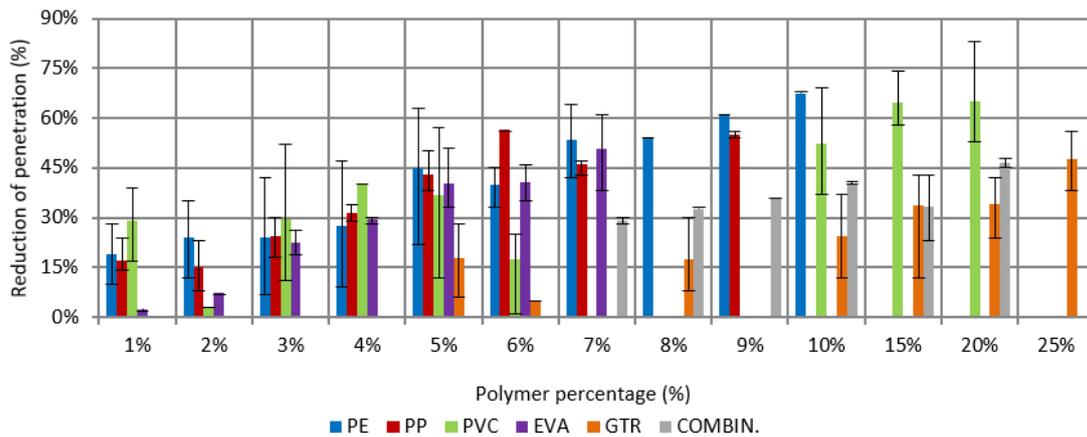


Figura 49. Reducción porcentual del valor de penetración tras la adición de distintos polímeros reciclados (Brasileiro et al., 2019).

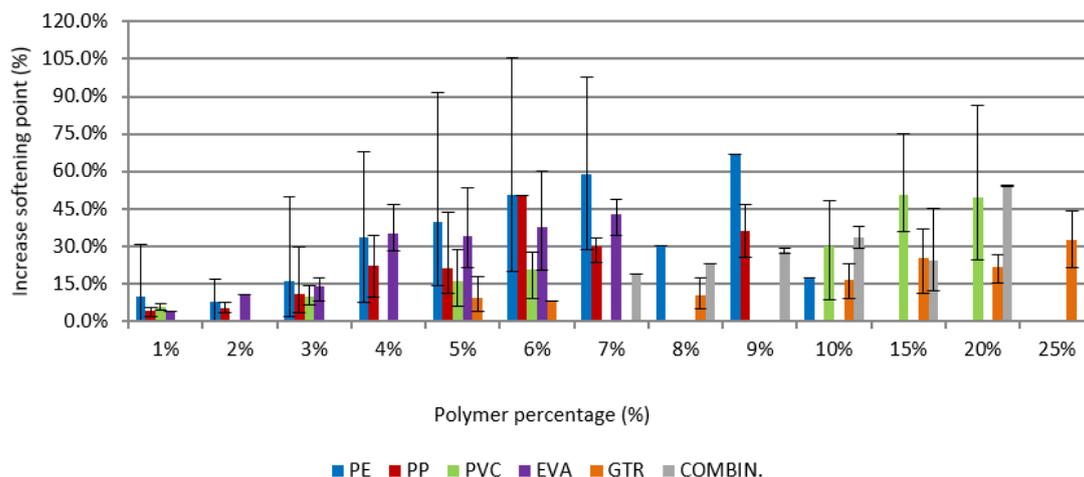


Figura 50. Aumento porcentual del valor de temperatura de reblandecimiento tras la adición de distintos polímeros reciclados (Brasileiro et al., 2019).

Para los contenidos más comunes de los distintos polímeros, la mayor tasa de cambio se obtiene mediante la adición de polietileno (PE), con niveles similares de reducción de penetración y aumentos menos marcados de la temperatura de reblandecimiento en el caso del polipropileno (PP). El PVC por su parte, obtiene menores variaciones que las que encontrábamos en el caso de las poliolefinas (PE y PP) indicando una menor rigidez de este tipo de betún modificado. Por otro lado, el empleo de EVA logra variaciones de penetración algo menores que las obtenidas con el empleo de poliolefinas, pero mayores que las que se obtenían con el PVC, lo que indica un grado de rigidez intermedio entre estos materiales. En el mismo sentido, el aumento de la temperatura de reblandecimiento del EVA está a medio camino entre la obtenida para el polipropileno (PP) y el polietileno (PE).

Finalmente, en el caucho al igual que para el resto de los polímeros, las variaciones aumentan a medida que se incrementa el contenido de polímero añadido. No obstante, se puede ver cómo en este caso y para el contenido habitual del 10% sobre peso de ligante, las variaciones son incluso menores que las obtenidas para contenidos menores de plastómeros, lo que indica que este material rigidiza en menor grado el betún resultante.

Considerando la influencia del betún base, en términos generales los mayores cambios registrados con la adición de plastómeros se obtienen con betunes de menor penetración, salvo en el caso del PVC. En cualquier caso, la influencia de la penetración del betún original demuestra una gran variabilidad, lo que indica que este factor es sólo uno de los muchos que se deben analizar cuando se considera la modificación de un ligante. Junto a este será necesario

considerar el tamaño y características del polímero y su interacción química con el betún, así como, las condiciones de mezclado (temperatura, tiempo y sistema de agitación).

Por este motivo, los ensayos tradicionales de caracterización del ligante tales como el ensayo de penetración o la determinación de la temperatura de reblandecimiento, aunque útiles como primera aproximación al estudio del betún modificado, resultan a menudo insuficientes para conocer en profundidad lo ocurrido durante la modificación y las propiedades obtenidas tras ella. Estos pueden llegar incluso a proporcionar una idea contradictoria e incompleta de los efectos obtenidos al no considerar, por ejemplo, la recuperación elástica proporcionada por algunos de estos materiales.

- Viscosidad

El empleo de ninguno de los polímeros estudiados en su porcentaje óptimo de adición supone un riesgo para la trabajabilidad de la mezcla al no sobrepasar en ningún caso el criterio de viscosidad límite de 3 Pa. s a la temperatura de 135°C planteado por el Strategic Highway Research Program (SHRP), ni siquiera en el caso de un mayor contenido de polímero como el 10% de PNFVU. No obstante, aspectos como el incremento de la viscosidad de los betunes modificados con PVC por la falta de integración del polímero o el aumento obtenido al combinar distintas tipologías (con el consiguiente incremento de la cantidad total de polímero) deben ser considerados a la hora de fijar las condiciones de modificación.

- Ductilidad

El empleo de plastómeros tiende a reducir la ductilidad del ligante, siendo esta disminución más marcada en el caso del polietileno, seguida por el polipropileno (PP) y el PVC. Frente a estos, únicamente el EVA es capaz de revertir la reducción de ductilidad llegando incluso a incrementarla. El descenso en la ductilidad debe ser analizado cuidadosamente ya que puede conducir a riesgos de fisuración de la mezcla a bajas temperaturas, especialmente tras su envejecimiento. Pese a que el empleo de PNFVU también reduce la ductilidad hasta niveles incluso inferiores al polietileno (PE), el incremento de la recuperación elástica proporcionado por este polímero es capaz de paliar el comportamiento frágil que conduce a la fisuración del material.

Variación de comportamiento reológico

La reología permite caracterizar un betún a una determinada temperatura de acuerdo tanto a su constitución (composición química) como estructura (organización física interna) de las moléculas en el material. De este modo es posible, además, evaluar la resistencia a las

deformaciones plásticas y a la fatiga que el empleo de dichos ligantes tendrán en las mezclas a las que se incorporan, su recuperación elástica o la resistencia a fisuración de las mismas, así como la evolución en el tiempo de estos factores tras la simulación de su envejecimiento.

A pesar de la utilidad de este tipo de análisis, no todos los estudios encontrados en la literatura los incluyen y cuando lo hacen, no es común evaluar los materiales a largo plazo tras su envejecimiento más allá del uso del RTFOT necesario para establecer el Performance Grade (PG) propuesto en Superpave (CR, Nejad et al. 2012; PE, Ahmedzade, 2014; EVA, Luo et al., 2011; CR+LLDPE y CR+PP, Yan et al. 2015). Sin embargo, la realización de este tipo de análisis es de vital importancia a la hora de evaluar la viabilidad del empleo de este tipo de materiales, ya que evalúa aspectos básicos para determinar la influencia del betún base, las propiedades del betún modificado y la evolución de las mismas a lo largo de su vida útil.

En aquellos estudios que incluyen una evaluación reológica de los betunes modificados con polímeros reciclados, se puede observar como los plastómeros (independientemente de su tipología) incrementan el valor de módulo de rigidez complejo (G^*) y reducen el ángulo de fase, especialmente a altas temperaturas, cuando se compara con el betún base. Esto está en consonancia con los cambios de penetración y temperatura de reblandecimiento y asegura un mejor comportamiento de estos betunes frente a las deformaciones plásticas.

En cuanto al PNFVU, el módulo de rigidez aumenta también a altas temperaturas, pero se reduce ligeramente en las bajas. El ángulo de fase por su parte, muestra generalmente un comportamiento más elástico en todo el rango de temperaturas, mejorando la resistencia a fatiga de la mezcla. Las características de las combinaciones de plastómeros y elastómeros se sitúan así a medio camino entre las que se obtendrían de manera separada, pero aprovechando los beneficios de cada tipo de polímero (mejora de la resistencia a fatiga y a deformaciones plásticas), y limitando sus inconvenientes (comportamiento más frágil a bajas temperaturas).

Estabilidad al almacenamiento

En cuanto a la estabilidad al almacenamiento, entre los plastómeros, únicamente el polietileno (PE) (hasta el 3% para HDPE y hasta el 5% para LDPE y LLDPE) y el etilvinilacetato (EVA, hasta el 5%) han demostrado ser estables sin la necesidad de aditivos compatibilizadores.

Mediante el empleo de estos, el polipropileno (PP) se puede incorporar hasta un 7% y el PVC hasta un 5%. Ya entre los elastómeros, se puede extender el empleo del PNFVU hasta un 15%. El empleo de aditivos estabilizadores como el anhídrido maleico (MA) está bastante extendido dentro de los plastómeros y demuestra ser capaz de aumentar la cantidad de polímero añadido (PE y EVA pueden llegar a contenidos hasta el 6%) e introducir cambios en las propiedades del

betún modificado, como un aumento de la rigidez (observado mediante una mayor variación de penetración y punto de reblandecimiento) pero también una mayor ductilidad que ayuda a disminuir la fragilidad de los mismos.

Otros aditivos comunes son el ácido polifosfórico (PPA) y las nano arcillas como la organo montmorillonita. Sin embargo, y a pesar de los beneficios aportados por este tipo de aditivos o por el empleo de tratamientos sobre los polímeros, se debe considerar que su uso conlleva un aumento del coste final del ligante modificado obtenido limitando, no tanto los beneficios medioambientales del empleo de materiales reciclados, pero si sus ventajas de carácter económico las cuales condicionan en última instancia su aplicabilidad.

Coste económico de los polímeros

En relación con esto último, es importante resaltar que, teniendo en cuenta que el coste promedio de los polímeros sintéticos como el SBS (el cual es el más empleado dentro de los ligantes modificados en refinería) oscila entre los 670 y los 2050 €/ton, el uso de polímeros reciclados supone una alternativa económicamente más interesante ya que su coste es notablemente inferior (Tabla 3).

Aunque el coste de la inversión inicial de una infraestructura (a través del coste de los materiales empleados en la mezcla en este caso) es uno de los factores que se debe considerar al estudiar su rentabilidad, la durabilidad de la misma, la necesidad de futuras intervenciones de mantenimiento o los beneficios indirectos de tipo ambiental generados también deben ser tenidos en cuenta. No obstante, a menudo es esta inversión inicial el criterio que prima, razón por la cual la reducción de la misma es un aspecto que ayudará a la aplicabilidad de soluciones que incorporen los polímeros reciclados.

Selección del polímero a emplear en el estudio

En relación con la revisión realizada en las secciones previas, en la Tabla 3 se recoge a modo de resumen las variables principales que influyen en la modificación y empleo de los distintos polímeros reciclados y en la variación de sus propiedades básicas.

Tabla 3. Resumen de las condiciones de mezclado y características para los porcentajes más comunes de polímeros reciclados comúnmente empleados en la modificación de materiales bituminosos (Brasileiro et al., 2019).

Características de la mezcla	Polietileno (PE)	Polipropileno (PP)	Cloruro de polivinilo (PVC)	Etil vinil acetato (EVA)	Polvo de caucho (PNFVU)
Dotación habitual sobre peso de ligante (%)	3-5	3 - 5	5	5	10
Temperatura de mezclado (°C)	163-180	160-180	165-180	170-180	170-180
Tiempo de mezclado (min)	60-150	60-90	20-180	40-240	90-140
Velocidad de mezclado (rpm)	1300-5000	120-1200	1300-2000	300-3000	800-5000
Reducción de penetración (%)	24 - 45	24 -43.5	37	40	22.5
Incremento de temperatura de reblandecimiento (%)	16.5 - 39.5	11 - 21	19	33	14.5
Uso aditivos compatibilizadores / dispersantes/ aglutinantes habituales	No – Hasta 3-5% PE; Sí– Entre 4% y 6% PE, (MA 0,87%- 5% por peso PE)	Sí (MA 0,91% por peso de PP)	Sí, (dispersantes)	No – Hasta 5% EVA Sí (MA 2% por peso de EVA)	No – Hasta 5-10% PNFVU Sí (TOR 3%-6% por peso de ligante)
Coste aproximado del polímero (€/t)	378.00-1261.00	461.00-1261.00	424.00-1051.00	-	336.00-1177.00

Así, cuando nos enfrentamos al deseo de emplear un determinado polímero es necesario en primer lugar, caracterizar bien mediante ensayos reológicos el betún que deseamos usar como base para, después, establecer un protocolo para la obtención de unas condiciones adecuadas (en tiempo y temperatura) de mezclado que permitan obtener una distribución homogénea y estable. Tras ello, será necesario caracterizar de nuevo de la manera más exhaustiva posible el efecto del polímero en las propiedades mecánicas de los materiales bituminoso a distintos niveles (betún, mástico y mezcla si el polímero es empleado por vía húmeda) y no solo en el momento de su puesta en obra, si no a lo largo de toda su vida útil (mediante la simulación en laboratorio de los procesos de envejecimiento).

En general, y como se deriva de la revisión del estado del arte realizada, dentro de los plastómeros, las poliolefinas son los polímeros reciclados que demuestran la consecución de una mayor resistencia a las deformaciones permanentes y un mejor comportamiento a altas temperaturas. Dentro de estas, la existencia de diversos tipos de polietileno (LLDPE, LDPE, HDPE), todos ellos con un punto de fusión considerablemente bajo, dota de una mayor versatilidad al uso de este polímero cuando se compara con el polipropileno, el cual además presenta mayores variaciones en su comportamiento (Casey, McNally, Gibney, & Gilchrist, 2008). Junto a esto, el polietileno (PE) está presente en un mayor número de aplicaciones, muchas de las cuales no han sido exploradas para este fin, razón por la cual su potencial de reciclaje es mayor, a lo que hay que sumar su bajo coste. El mayor punto de fusión y la necesidad de una mayor precaución en el mezclado por los gases emitidos por el PVC lo hacen una opción menos interesante. El polímero de tipo EVA, por su parte, resulta interesante ya que por su estructura permite la consecución de una mayor recuperación elástica, sin embargo, la mayor variabilidad dentro de su reciclado y su considerable menor disponibilidad lo hacen una opción con mucho menor potencial de empleo. Más allá de la exploración de polietilenos reciclados de distinto origen, las ventajas del empleo junto con un elastómero, llevan a considerar el empleo conjunto de este tipo de plastómeros con PNFVU, un elastómero reciclado de probada eficacia y también con un elevado potencial de reciclaje

2.4 Conclusiones del estado del arte. Motivación de la tesis doctoral.

En los últimos años, el volumen de tráfico y nivel de carga experimentado por las infraestructuras ha aumentado considerablemente debido al mayor flujo de pasajeros y a la globalización del tráfico de mercancías en el caso de carreteras y pavimentos portuarios y aeroportuarios, y al auge de la alta velocidad en ferrocarriles. A esto se suma el hecho de que cada vez son más frecuentes la aparición de fenómenos climáticos extremos dando lugar a un deterioro más rápido de las mismas y la necesidad de diseño de materiales de mejores prestaciones y mayor durabilidad. Estos permiten optimizar los recursos económicos disponibles, limitando la necesidad de mantenimiento de las infraestructuras ya existentes, tarea en la cual se centra la inversión en países desarrollados una vez el grueso de su red de infraestructuras está implementado.

Dentro de las infraestructuras de transporte las mezclas bituminosas son materiales con una elevada componente estructural ya que directa o indirectamente son introducidas para soportar las cargas del tráfico que circula sobre ellas. Son fundamentales en infraestructuras tales como

pavimentos bituminosos en carreteras, puertos y aeropuertos o en la formación de capas de asiento con mayor capacidad portante para la sección ferroviaria. Estos materiales cumplen una doble función, por un lado, la de transmitir las cargas del tráfico a las capas inferiores y por otro, la de mejora de las condiciones de seguridad y confort asociadas a la protección de las capas subyacentes y a la obtención de una superficie regular y uniforme. Junto a esto, también ayudan a la impermeabilización de la infraestructura limitando el daño que la acción del agua puede hacer sobre la misma.

Para que dichas mezclas sean capaces de resistir las nuevas exigencias sin la aparición de las problemáticas tales como deformaciones permanentes, la pérdida de poder aglomerante, la fisuración, la resistencia a esfuerzos específicos (como el punzonamiento en infraestructuras ferroviarias o la resistencia a impactos en zonas de carga) o la falta de capacidad portante, es necesario el empleo de soluciones que mejoren las propiedades de la mezcla bituminosa. En este sentido, pese a que los ligantes modificados con polímeros son capaces de aportar las mejoras estructurales necesarias vinculadas a una menor susceptibilidad térmica y mayor resistencia de la mezcla a fatiga y deformaciones permanentes, su empleo también conlleva algunos inconvenientes vinculados a sus costes de fabricación (a menudo a través de la creación de compuestos entre varios polímeros) y procesado que encarece el coste final de la mezcla a la que se aplica. Debido a ello su empleo se limita a capas de rodadura en vías de alta capacidad o para pavimentos con problemáticas muy específicas, quedando fuera de aplicación en el resto de vías (urbanas, locales y secundarias), o en las tareas de refuerzo del grueso de la red.

Por otra parte, en las últimas décadas se ha generado una mayor concienciación medioambiental ligada a la necesidad de emplear materiales y procesos productivos más sostenibles. En este sentido, la creciente preocupación en los últimos años sobre el consumo mundial de plásticos y el residuo generado tras el fin de su vida útil, hace que este sea un material de elevada disponibilidad y cuya reutilización es tremendamente interesante desde un punto de vista medioambiental permitiendo extender las ventajas técnicas aportadas por los ligantes modificados con polímeros a un mayor número de actuaciones al reducir significativamente el coste de los mismos.

Dentro de estos polímeros reciclados, tal y como queda reflejado en la revisión realizada el polietileno es una de las alternativas más interesantes debido a la enorme disponibilidad del residuo, existiendo materiales que hoy por hoy no son reutilizados como las geomembranas, las cuales por la presencia de fibras en su composición pueden mejorar las propiedades finales de la mezcla a la que se aplican. Este polímero es capaz de reducir las deformaciones permanentes

a altas temperaturas y mejorar tanto la capacidad portante de la mezcla como su resistencia al envejecimiento. Junto a esto, el empleo conjunto de este material con PNFVU, muestra ser una alternativa interesante al complementar al polietileno con una mayor recuperación elástica (reduciendo el riesgo de fisuración a bajas temperaturas) a la vez que incrementa la resistencia al envejecimiento y el potencial de reciclaje de la mezcla resultante.

No obstante, y pese a que distintos estudios han probado la validez de este tipo de polímeros, existen aún diferentes aspectos en los que aún se debe profundizar de manera que se pueda dotar de las mayores garantías posibles su empleo. Para ello, es preciso evaluar el grado en que los mismos puede modificar el ligante, profundizando en la interacción de ambos materiales y cómo las condiciones de mezclado, el tipo de polímero y su contenido influyen en la misma a través de las propiedades mecánicas obtenidas (evaluadas mediante reología) su resistencia al envejecimiento y estabilidad al almacenamiento del material. Tras esto, es necesario igualmente comprobar el grado en el que dichas propiedades se transmiten desde el ligante tanto al interaccionar con el mástico y el árido fino (a nivel de mortero) como a nivel de mezcla. Así, una vez comprobado el efecto de los polímeros se deberá determinar el mejor modo de emplearlos y, para ello, se debe evaluar si el uso de la vía seca es una alternativa al empleo de los ligantes modificados que facilite la incorporación de los mismos. Finalmente, una vez establecido el efecto del polímero y el modo de aplicarlo, se debe garantizar que las mezclas que los incorporan mejoren el comportamiento a largo plazo de las infraestructuras que las incorporen (evaluando su resistencia a los principales modos de fallo de estas y al paso del tiempo) y que sirvan para mejorar la respuesta estructural de las mismas.

Dando respuesta a dichas cuestiones, en la presente tesis doctoral se evalúa la viabilidad del empleo de polímeros reciclados para la mejora estructural de infraestructuras de transporte. Para ello, se estudia el empleo de polietileno reciclado de distinto origen y su posterior combinación con PNFVU. El empleo de dichos materiales permite extender las ventajas estructurales aportadas por los polímeros a un mayor número de infraestructuras al dotar a esta tecnología de mayores garantías, reducir el coste de su empleo y contribuir a la solución de un importante problema medioambiental de la actualidad.

Objetivos

Objectives

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

En base a las conclusiones extraídas a partir del estudio del estado del arte se ha podido comprender que el empleo de polímeros reciclados tales como el polietileno (procedente de distintas fuentes) y su combinación con caucho muestran un elevado potencial a la hora de mejorar las prestaciones mecánicas de materiales bituminosos aplicados a distintas infraestructuras de transporte.

No obstante, la necesidad de profundizar en el estudio de estas soluciones para proporcionar un mayor grado de confianza en las mismas lleva al objetivo principal de esta tesis doctoral, que se centra en el estudio de la viabilidad de incorporar polímeros de origen reciclado a infraestructuras de transporte como alternativa económica y sostenible para mejorar la capacidad estructural de las mismas. A partir de ello, será posible extender el empleo de estos materiales a un mayor número de vías e infraestructuras.

3.2 Objetivos específicos

Los polímeros reciclados incorporados a la mezcla bituminosa deben ser capaces de aportar mejoras estructurales con respecto de aquellas mezclas que no los incorporan y esas mejoras deben quedar de manifiesto tanto a nivel de ligante como en el conjunto de la mezcla. La presente tesis doctoral trata de evaluar si la incorporación de polímeros reciclados a las mezclas bituminosas puede ser una alternativa técnica, medioambiental y económicamente interesante que aporte las suficientes garantías para generalizar su empleo. Para ello, se marcan los siguientes objetivos específicos:

- Profundizar en el estudio de la interacción entre ligante y polímero evaluando los contenidos óptimos de los distintos polímeros a través del estudio de su reología y la estabilidad al almacenamiento.
- Evaluar el grado en el que la mejora de las propiedades mecánicas obtenidas a nivel de ligante tras la adición de los polímeros reciclados son escalables, tanto a nivel de mortero bituminoso como a nivel de mezclas asfáltica completas.
- Determinar el método óptimo de incorporación del polímero reciclado a la mezcla, comparando en términos de trabajabilidad el empleo por vía seca y por vía húmeda.

- Estudiar la contribución de los polímeros reciclados en el comportamiento a largo plazo y la mejora estructural de mezclas bituminosas aplicadas a distintas infraestructuras de transporte.
- Evaluar la potencial reducción de espesores de capa debida a la utilización de polímeros reciclados durante la fase de dimensionamiento, así como, el coste comparativo y el potencial consumo de plásticos que supone su empleo.

Metodología

Methodology

4. Metodología

Para la consecución de los objetivos marcados, la metodología seguida en esta tesis doctoral comenzó por una revisión bibliográfica, incluida en el estudio del estado del arte, que permitió seleccionar los polímeros reciclados más adecuados para su estudio. Posteriormente, se analizó la interacción de estos con el betún, la escalabilidad de sus efectos a nivel de mortero y mezcla bituminosa, así como la aptitud de estos materiales para mejorar el comportamiento estructural y a largo plazo de distintas infraestructuras de transporte de manera más económica y sostenible

Este cuarto capítulo se centra en la metodología seguida para el estudio de la viabilidad del empleo de polímeros reciclados para la mejora estructural de materiales bituminosos, describiendo, por un lado, los distintos materiales empleados y, por otro parte, el plan de trabajo que recoge las distintas actividades llevadas a cabo para la consecución de los objetivos marcados en esta investigación.

4.1 Materiales

4.1.1 Polímeros reciclados

Como materia prima para la obtención de materiales bituminosos con propiedades estructurales mejoradas, se parte de los polímeros reciclados de mayor interés de entre aquellos estudiados en la revisión del estado del arte recogida en el capítulo 2, es decir, el polietileno lineal de baja densidad (LDPE) procedente del reciclaje doméstico, el polietileno lineal de baja densidad procedente de residuos de geomembrana (LDPE GEO) y PNFVU. Este último, utilizado para evaluar el efecto de la combinación de los residuos de tipo polietileno con un polímero de tipo elastomérico reciclado comúnmente empleado en la modificación de ligantes bituminosos.

De esta forma, el primer polímero estudiado fue un plastómero poliolefínico de baja densidad reciclado tipo LDPE procedente del reciclaje de consumo doméstico (Figura 51). Su bajo punto de fusión (entre 110 y 120 °C) hace posible su empleo como modificador del ligante bituminoso, ya que la temperatura de trabajo de este oscila entre los 150 y 180 °C.

Este fue empleado como polímero de referencia a la hora de establecer la influencia del contenido de polímero en la interacción con el betún, así como la posibilidad de empleo por vía seca, al tener una composición más simple que el resto de soluciones a estudiar: el residuo de

geomembrana (que incorpora además la presencia de fibras) y la combinación con polímeros de tipo elastomérico como el caucho.



Figura 51. Polietileno reciclado de uso doméstico empleado en el estudio.

Este material tiene una densidad de 0.93 Mg/m^3 y procede del reciclaje urbano tras ser sometido a una primera trituración en planta que deja el material tal y como se observa en la Figura 51, con la distribución de tamaños que se puede consultar en la Tabla 4.

Tabla 4. Granulometría del LDPE reciclado de origen doméstico.

Tamiz (mm)	% Pasa
20	100
16	93
12.5	83
11.2	75
8	55
5.6	36
4	20
2	7
1	2
0.5	0.4
0.5	0.1
0.125	0
0.063	0

Tal y como se ha referido en el estudio del estado del arte, la reducción del tamaño del polímero contribuye a facilitar su interacción con el betún (Maharaj et al.,2015). Por ello, y siguiendo las referencias de otros estudios como el de Punith & Veeraragavan (2007) que emplearon en este tipo de polímero con buenos resultados de estabilidad y mejora de propiedades para tamaños de partícula menores a 2 mm, el polímero se sometió a un proceso de trituración adicional hasta

alcanzar dicho tamaño. Con ello, se facilita de modificación y mejora la estabilidad del ligante modificado resultante al aumentar la superficie específica de contacto entre el polímero y el betún.

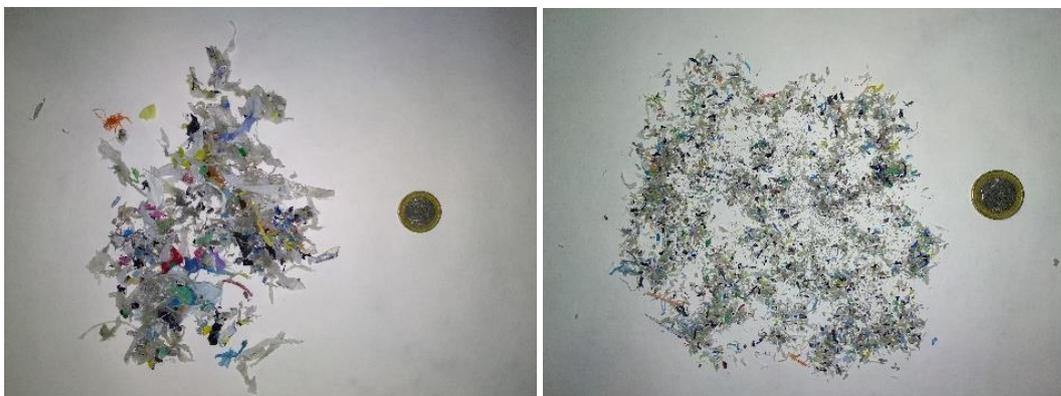


Figura 52. Polietileno reciclado antes y después de la trituración.

Para llevar a cabo esta trituración, se hizo uso de un robot de cocina (Figura 53 a) el cual a través del empleo de cuchillas en cizalla que alcanzan velocidades de 10000 rpm (Figura 53 b), permitía triturar el material (Figura 53 c). El proceso de trituración se mantenía hasta lograr disgregar el material hasta el tamaño de partículas deseado, no obstante, y para garantizar que partículas de mayor tamaño sin triturar no fuesen incorporadas, el material era pasado a través de un tamiz de 2 mm antes de su empleo.

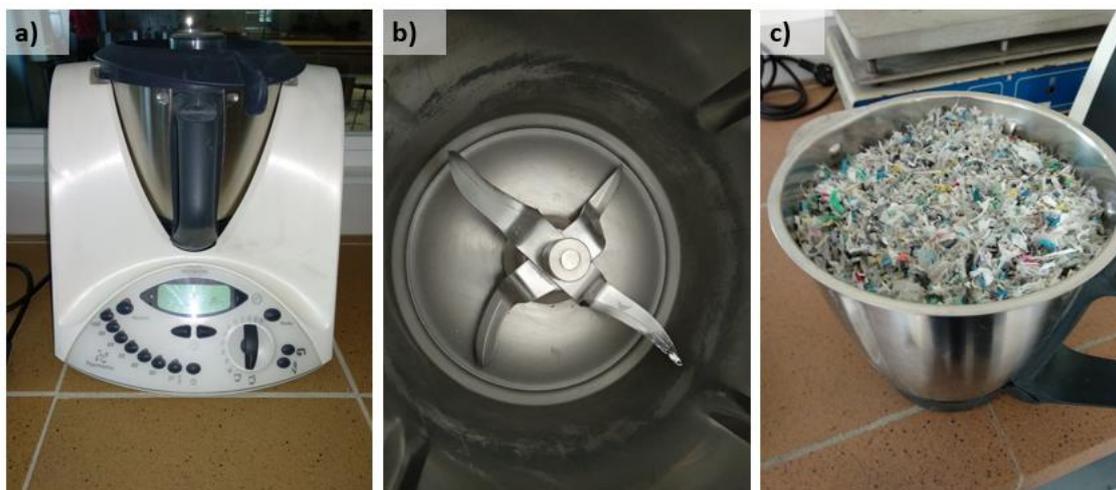


Figura 53. Robot de cocina empleado en la trituración del polietileno de uso doméstico (a). Cuchillas empleadas para la trituración (b). Colocación del material en el vaso para su trituración (c).

El segundo polímero estudiado fue el polietileno procedente de otro residuo que no ha sido empleado en la modificación de ligantes bituminosos con anterioridad, como son las geomembranas utilizadas en aplicaciones de impermeabilización (LLDPE GEO) (Figura 54). Este material tiene una densidad de 0.98 Mg/m^3 y se compone de dos capas. Por un lado, una capa

impermeable, compuesta en su mayor parte de polietileno de baja densidad similar al anterior (LDPE), pero de estructura lineal (LLDPE) lo que facilita la modificación y lo hace más estable (Liang et al., 2019). Junto a este polímero también se incluyen en su composición la presencia de otras poliolefinas como el polipropileno (PP). Por otro lado, el material incluye una red de fibras de poliéster en la capa de refuerzo. El conjunto de poliolefinas que componen la geomembrana y la presencia de fibras contribuyen a que este material tenga una potencial aplicación en mezclas asfálticas que va más allá del reciclaje directo vinculado a la reutilización del polietileno, incrementando el porcentaje de reciclaje efectivo de dicho polímero. Junto a estos materiales, el residuo también contiene distintos aditivos como tintes, antioxidantes y estabilizadores térmicos y de radiación UV como parte de la composición de la capa impermeabilizante.

Antes de ser incorporado al betún, teniendo en cuenta el mayor grosor de este material (1.2 mm) al estar compuesto por dos capas, se decidió emplearlo en partículas de tamaño máximo de 5 mm (Figura 54). La elección de dicho tamaño persigue el aprovechamiento de las fibras presentes en el residuo como componente estructural, ya que tamaños menores implican la separación de capas y la disgregación del material. Pese al mayor tamaño, el carácter lineal de este polímero facilita la estabilidad del mismo (Liang et al., 2019).

Para la obtención del mismo, los trozos de geomembrana sobrantes durante la producción y proporcionados por el fabricante fueron sometidos a un proceso de corte. Con esto, se logra aumentar la superficie específica del material de manera similar a lo estudiado para el LDPE.



Figura 54. Polietileno reciclado procedente de geomembranas empleado en el estudio.

Por último, la tercera solución estudiada involucra la combinación de polímeros. En la revisión realizada, ya se han referido las ventajas de combinar más de un tipo de polímero como medio para aunar los beneficios que estos pueden aportar por separado. De este modo, y teniendo en

cuenta que uno de los inconvenientes del empleo de plastómeros es que no aportan una recuperación elástica adicional a los materiales bituminosos, se eligió el empleo de estos combinados con un elastómero. Dado el potencial de reciclaje y la tradición en su empleo, se decidió combinar el LDPE previamente estudiado en su contenido óptimo, con el caucho presente en el polvo de neumático al final de su vida útil (PNFVU) (Figura 55). Las características de dicho material pueden consultarse en la Tabla 5.



Figura 55. Polvo de caucho empleado en el trabajo de investigación.

Tabla 5. Propiedades del PNFVU empleado en el trabajo de investigación.

Propiedades	Tamaño tamiz (mm)	% Pasa
Granulometría (UNE EN 933-1)	2	100
	1.6	100
	1	100
	0.5	86
	0.25	21
	0.125	3
	0.063	1.6
Densidad (Mg/m ³)	1.17	
Color	Negro	
Morfología de las partículas	Irregular	
Contenido de agua	< 0.75	
Contenido de fibras textiles (% en peso)	< 0.5	
Contenido de metales (% peso de caucho)	< 0.1	

4.1.2 Betunes

Para la producción de ligantes modificados se empleó como base un ligante B 50/70. Junto a este y como referencia para los modificados con polímeros reciclados, se estudiaron distintos

betunes modificados en refinería habitualmente aplicados en infraestructuras de transporte (Tabla 6).

Así, se estudió un betún modificado tipo PMB 45/80-65 comúnmente empleado en mezclas para capa de rodadura de pavimentos de carretera. Por otra parte, como ligante utilizado en aplicaciones ferroviarias, se escogió un betún modificado en refinería (PMB 20/30-63C) para mezclas de elevada rigidez y alta capacidad portante. Dicho ligante tiene un comportamiento intermedio entre el de un betún de penetración 15/25 y uno modificado del tipo PMB 10/40-70. Finalmente, en pavimentos portuarios, se empleó un betún asfáltico altamente modificado y de elevadas prestaciones (PMB 20/50-75). En la Tabla 6 se pueden observar las propiedades básicas de penetración y punto de reblandecimiento de estos betunes.

Tabla 6. Características básicas de los ligantes de altas prestaciones para infraestructuras ferroviarias y portuarias.

Ligante	Penetración (dmm) (EN - 1426)	Temperatura de reblandecimiento (°C) (EN -1427)	Temperatura de trabajo (°C)
Betún B 50/70	50-70	46-54	150-160
Betún modificado para pavimentos de carretera (PMB 45/80-65)	45-80	65	155-165
Betún modificado de altas prestaciones para infraestructuras ferroviarias (PMB 20/30-63C)	20-30	62	170-180
Betún modificado de altas prestaciones para puertos (PMB 20/50-75)	20-50	75	170-180

4.1.3 Áridos

En la fabricación de las distintas mezclas y morteros analizados en la presente tesis doctoral se utilizaron áridos de naturaleza caliza y ofítica. Como fracción gruesa se emplearon tres fracciones distintas de áridos de tipo calizo: 18/25, 12/18, 6/12 y dos de tipo ofítico: 12/18 y 6/12. Por su parte, para la fracción fina se empleó una fracción de tamaño 0/6 de naturaleza caliza. Las características de estos áridos se incluyen en la Tabla 7.

Tabla 7. Propiedades básicas de los áridos empleados en las distintas mezclas

Propiedad analizada	Caliza 18/25	Caliza 12/18	Ofita 12/18	Caliza 6/12	Ofita 6/12	Caliza 0/6
Coefficiente de forma / Índice de Flakiness (%) (UNE EN 933-3)	8	12	7	10	8	-
Resistencia al desgaste. Coeficiente de Los Ángeles (%) (UNE EN 1097-2)	23	23	8	23	8	-
Contenido de materia orgánica (%) (UNE EN -103204)	0.2	0.2	0.1	0.4	0.1	-
Equivalente de arena (%) (UNE EN 933-8)	-	-	-	-	-	77
Densidad aparente (Mg/m ³) (UNE EN 1097-6)	2.86	2.85	3.29	2.86	3.27	3.01
Densidad superficie seca saturada (Mg/m ³) (UNE EN 1097-6)	2.83	2.81	3.26	2.81	3.20	2.97
Densidad seca (Mg/m ³) (UNE EN 1097-6)	3.17	2.83	3.24	2.83	3.17	2.97
Absorción de agua (%) (UNE EN 1097-6)	0.39	0.49	0.44	0.62	0.95	0.56



Figura 56. Áridos de naturaleza caliza empleados en el trabajo de investigación



Figura 57. Áridos de naturaleza ofítica empleados en el trabajo de investigación.

4.1.4 Fíller

En relación al fíller utilizado para las distintas mezclas y morteros bituminosos, este fue cemento de tipo CEM II/B-L 32.5 N, del cual un 96% tiene un tamaño de partículas menor a 0.063 mm y con una densidad aparente (UNE EN 1097-3, Anexo A) de 0.6 Mg/m³.



Figura 58. Cemento empleado como filler de aportación en la tesis doctoral.

4.1.5 Fibras

Dentro de la comparativa con las fibras incluidas como parte del residuo de geomembrana, algunas de las mezclas incluyeron el aporte de fibras acrílicas (Figura 59). Estas tenían una densidad de 1.14 Mg/m³ y fueron incorporadas a la mezcla en un contenido del 0.3% por peso de mezcla (Moreno-Navarro et al. 2014) siendo mezcladas con los áridos previo a la a adición de betún.



Figura 59. Fibras acrílicas empleadas en el trabajo de investigación.

4.1.6 Morteros y mezclas bituminosas

Durante el desarrollo de la tesis, se estudió el efecto de los polímeros reciclados tanto a nivel de ligante, como a nivel de mezcla a distintas escalas. Por ello, por un lado, se estudiaron morteros

bituminosos para analizar la interacción de los betunes modificados con el mástico y la fracción más fina de los áridos y, por otro lado, su empleo en el conjunto de la mezcla asfáltica con el fin de analizar la variación en el comportamiento mecánico y estructural cuando son aplicadas en carreteras, infraestructuras ferroviarias y puertos.

4.1.6.1 Morteros bituminosos

Los morteros bituminosos están compuestos por el mástico de la mezcla (formado por el ligante bituminoso y el fíller) así como la parte más fina de los áridos (habitualmente < 2mm, (Calvancanti, 2010)). Para su fabricación, se eligieron áridos de naturaleza caliza ya que la alcalinidad de esta tipología es más compatible químicamente con la del betún. La granulometría del mortero se puede consultar en la Tabla 8 y esta se compone de un 70% de áridos (caliza 0/2 procedente de la fracción fina previamente definida) y un 30% de fíller cemento como el previamente descrito.

Tabla 8. Granulometría de los morteros empleados en la tesis doctoral.

Tamiz (mm)	% Pasa
2	100
0.5	18
0.063	0

Fabricación de morteros bituminosos

Para la fabricación de los morteros, se emplearon los distintos ligantes modificados desarrollados (Betún base + LDPE, Betún base + LLDPE GEO, Betún base + LDPE +PNFVU), así como los betunes de referencia (B50/70 y PMB 45/80-65). El proceso seguido para la determinación del contenido de ligante a emplear en la fabricación de los morteros fue el propuesto por Calvancanti (2010).

Este se basa en la fabricación de una mezcla completa, que después es disgregada y tras ello se deja enfriar. Una vez hecho esto, la muestra se tamiza ayudándose de bolas de metal en una cantidad variable según menor luz de tamiz, para separarla en cuatro grupos. La extracción de betún de las distintas fracciones, y particularmente la de aquella cuyo tamaño es menor a 2 mm (tamaño máximo de árido del mortero) permite la obtención del contenido efectivo de betún, que, en este caso, fue del 8% por peso total de mezcla.

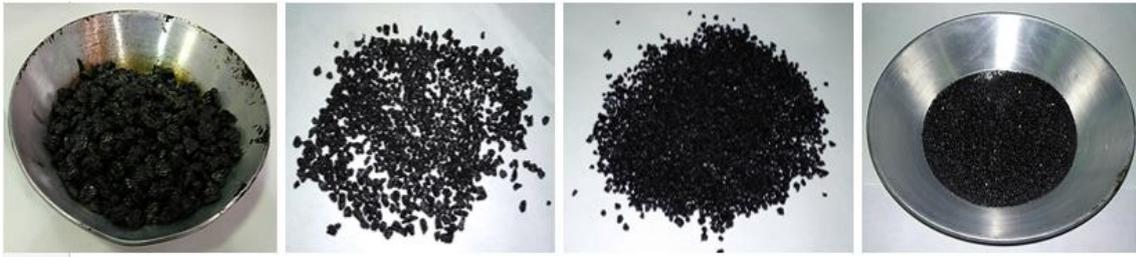


Figura 60. Separación de la mezcla de referencia en grupos para la determinación del contenido de ligante.

Una vez definido el contenido de betún y la densidad objetivo a alcanzar para cada tipología de mortero, se procedió a la fabricación de los mismos. Para ello, se fija la temperatura de los áridos en función de la temperatura de trabajo de los ligantes modificados desarrollados y de los distintos betunes de referencia, manteniendo un control de temperatura durante el proceso mediante cámara termográfica de infrarrojos (Figura 61).

El proceso y tiempo de mezclado utilizado fue el necesario para garantizar una envuelta homogénea y completa entre los elementos de los morteros bituminosos. Para ello, en primer lugar, el árido calizo se mezcló entre sí para homogeneizarlo durante 20 segundos. A continuación, se incorporó el ligante y se amasó el mortero durante otros 20 para homogeneizar su dispersión y envuelta sobre la fracción arena. Finalmente, se añadió la fracción fíller de manera paulatina continuando el proceso de mezclado durante otros 60 segundos una vez incorporado el polvo mineral en su totalidad.

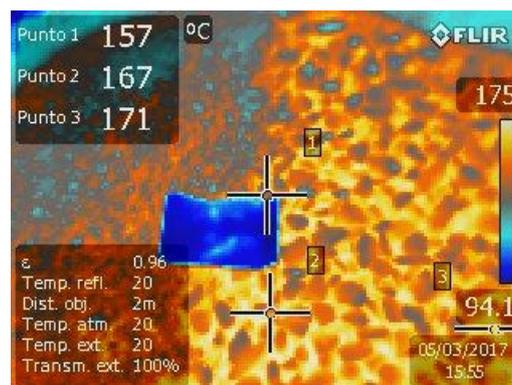


Figura 61. Control termográfico durante el mezclado.

Tras la fabricación del mortero, se compactaron probetas con un tamaño 100 mm de diámetro y 40 mm de altura utilizando un compactador giratorio a una temperatura de compactación de 155 °C. Se establecieron como condiciones de compactación un número suficiente de giros que permitiese alcanzar la densidad calculada previamente mediante la combinación de densidades de los distintos componentes del mortero, obteniendo así un valor mínimo de huecos en la

probeta. Para estas tipologías de mortero, 200 giros fueron suficientes en todos los casos. Para ello, se calculó el volumen deseado para la probeta y se ajustó la masa de mezcla fijando una altura objetivo de compactación de 40 mm de altura. Como variables de la compactación se emplearon:

- Presión de consolidación de 600 kPa
- Ángulo de giro de 0.82°
- Velocidad de giro superior a 31 rpm.

De cada uno de los morteros estudiados, se fabricaron 3 probetas con compactador giratorio, a las que posteriormente se determinó su densidad (aparente y geométrica). Tras ello, las probetas se sometieron a un proceso de aserrado mediante una sierra de corte de precisión por coordenadas (Figura 8) para obtener las probetas prismáticas de 8.5 mm x 8.5 mm x 50 mm que serían las que se caracterizarían mecánicamente mediante el dispositivo DMA.



Figura 62. Cortadora de precisión por coordenadas empleada en la obtención de las muestras a analizar.

4.1.6.2 Mezcla bituminosa tipo SMA 11 para pavimentos de carreteras y subbalasto bituminoso.

Una de las mezclas donde el empleo de los polímeros reciclado puede tener mayor interés son mezclas discontinuas como las de tipo BBTM o mezclas tipo SMA. Este último tipo de mezcla, denominada SMA por sus siglas en inglés (Stone Mastic Asphalt), permite obtener una elevada resistencia a la fatiga y a las deformaciones permanentes y una menor susceptibilidad térmica, por lo que son adecuadas para realzar los beneficios que el empleo de polímeros como los plastómeros estudiados.

Del mismo modo, son mezclas que habitualmente emplean betunes modificados, lo que permite dar una valoración de la reducción de costes asociada al empleo de las mezclas con polímero

reciclado. Finalmente, y dado que este tipo de mezclas suele emplear contenidos altos de betún (con la consecuente mejora de la cohesión y comportamiento frente a la acción del agua de la mezcla) pero tienen un esqueleto mineral (compuesto por en torno a un 20% de árido fino, para no comprometer la macrotextura superficial) que no permite la retención del ligante, es habitual el empleo de fibras. Esto permitió evaluar la presencia de estas en el residuo de geomembrana, así como comparar el efecto que otros materiales como el PNFVU tiene en las propiedades de la mezcla.

La presencia de estos permite elevar el contenido de ligante empleado, con la consecuente mejora de la cohesión y comportamiento frente a la acción del agua de la mezcla, sin comprometer la consecución de una adecuada macrotextura superficial por la migración hacia la superficie del betún. Ambos, betunes modificados y fibras incrementan además la viscosidad del ligante dificultando la aparición de problemas de drenaje del mismo y permitiendo la creación de una capa más espesa de betún alrededor de los áridos lo que limitará la incidencia de los procesos de envejecimiento (Tauste et al., 2018b).

El encaje granulométrico de este tipo de mezcla se puede ver en la Figura 63. Este fue obtenido mediante la combinación ofita para la fracción gruesa de áridos (6/12) y árido calizo para la fracción fina (0/6). Las características de estos áridos se incluyen en la Tabla 7. El fíller de aportación fue de tipo cemento. Por su parte, los límites granulométricos escogidos para esta mezcla están en consonancia con los comúnmente utilizados y recogidos en la norma UNE EN 13108-5.

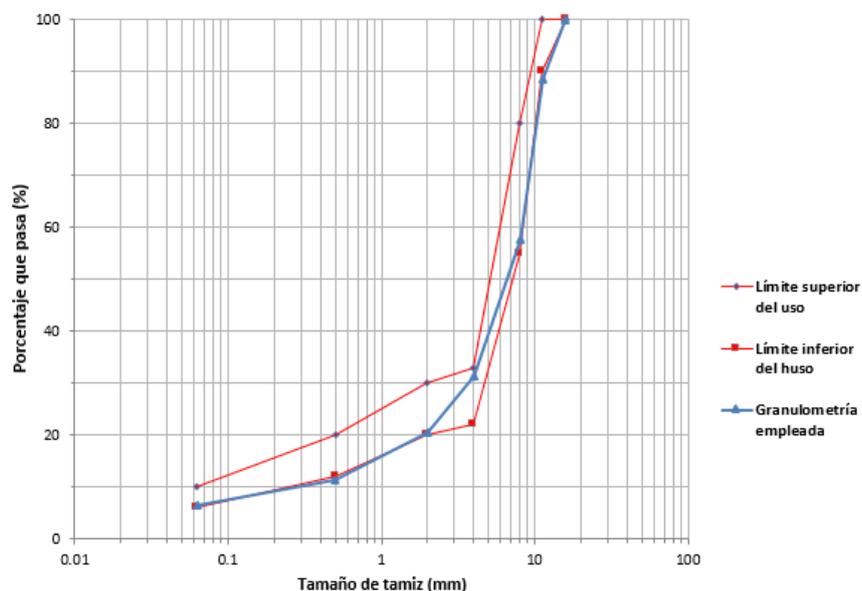


Figura 63. Encaje granulométrico con ofita como árido grueso de la mezcla SMA 11 empleada.

En cuanto a los ligantes empleados, estos procedieron de la modificación del ligante base escogido con los contenidos óptimos distintos polímeros reciclados. Por otra parte, y como mezclas de referencia, se fabricaron mezclas empleando el betún base (B 50/70), el ligante modificado comercial de referencia (PMB 45/80-65) y la combinación de este último con fibras acrílicas (para la comparación con las fibras presentes en el residuo de geomembrana). En base a experiencias previas de diseño y con el objetivo de minimizar las variables de estudio, se fijó un contenido de betún del 5.3% sobre peso de mezcla para las distintas mezclas estudiadas.

En la Tabla 9 se muestran las propiedades volumétricas básicas de las distintas tipologías fabricadas y los resultados del ensayo Marshall:

Tabla 9. Propiedades de las distintas mezclas estudiadas para su aplicación en carreteras.

Tipo de ligante	B50/70	PMB 45/80-65	B50/70 5% LDPE	PMB 45/80-65 0,3% Fibras	B50/70 5% GEO LLDPE	B50/70 5% LLDPE + 10% PNFVU
Contenido de betún (% sobre total mezcla)	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3
Densidad máxima (Mg/m ³)	2.801	2.810	2.746	2.796	2.795	2.729
Densidad aparente (Mg/m ³)	2.697	2.674	2.665	2.687	2.717	2.607
Contenido de huecos (%)	3.7	4.8	2.9	3.9	2.8	4.5
Contenido huecos en áridos (%)	17.6	18.6	16.6	17.7	16.8	17.9
Contenido huecos rellenos betún (%)	78.9	74.0	82.6	78.0	83.4	74.9
Estabilidad Marshall (kN)	8.1	11.7	9.9	12.7	10.5	8.8
Deformación Marshall (mm)	5.0	5.0	2.7	5.7	4.3	2.5

En ella, se puede apreciar cómo una vez fijado un contenido óptimo de ligante para las mezclas de referencia, el mantenimiento de este en las mezclas que incorporan los distintos polímeros reciclados (a fin de no introducir variables adicionales a la hora de establecer las comparativas) conllevan cambios sensibles en las propiedades volumétricas de la mezcla. De este modo, se puede ver como la adición de polímeros reciclados reduce la densidad máxima de las mezclas con respecto a las que emplean los betunes de referencia (SMA 11 B50/70, SMA PMB 45/80-65) salvo en el caso de la mezcla que incorpora el residuo de geomembrana en el que la presencia de fibras permite alcanzar una densidad similar a la de la mezcla con fibras de referencia (PMB 45/80-65 + 0.3 % Fibras). En este mismo sentido, la presencia de polietileno (LDPE o LLDPE) da lugar a mezclas con un contenido de huecos algo menor, esta tendencia se contrarresta con la presencia de PNFVU que, pese a reducir de manera significativa las densidades máximas y

aparentes de la mezcla, permite alcanzar un contenido de huecos mayor dando lugar a mezclas más abiertas y flexibles.

En relación al ensayo Marshall, las mezclas modificadas con polímeros reciclados muestran una estabilidad intermedia entre el betún base y las mezclas modificadas con el betún modificado de referencia (PMB 45/80-65) encontrando en ambos casos un aumento asociado a la presencia de fibras. En cuanto a la deformación, la presencia de polietileno reduce los valores obtenidos con respecto a las mezclas de referencia.

Por otra parte, mezclas discontinuas, abiertas o de tipo SMA como las estudiadas en la presente tesis pueden tener en ocasiones problemas de escurrimiento de ligante ligados al empleo de contenidos más altos de betún y a la granulometría de las mismas. En la Tabla 10 se incluyen los valores del ensayo de escurrimiento (UNE EN 12697-18) realizado a las distintas tipologías de mezcla. Para este ensayo se establece un límite del 0.3% como indicador del riesgo de escurrimiento en una mezcla.

Tabla 10. Porcentaje de escurrimiento de ligante registrado para las distintas mezclas

Tipo de mezcla	Porcentaje de escurrimiento (%)
SMA 11 B 50/70	0.5
SMA 11 PMB 45/80-65	0.3
SMA 11 B 50/70 + 5% LDPE	0.2
SMA 11 PMB 45/80-65 + 0.3% Fibras	0.1
SMA 11 B 50/70 + 5% LLDPE GEO	0.2
SMA 11 B 50/70 + 5% LDPE + 10 % PNFVU	0.1

Como se puede apreciar, el límite es superado por la mezcla fabricada con betún convencional (B50/70). A partir de aquí, el uso del betún modificado de referencia (PMB 45/80-65) consigue llegar el valor al límite mientras que la adición de fibras lo reduce a un valor mínimo de 0.1%. En relación a los betunes modificados con polímeros reciclados, el empleo de polietileno reciclado consigue reducir significativamente el riesgo de escurrimiento del ligante hasta valores inferiores a los del betún modificado de referencia (PMB 45/80-65) o incluso, análogos a la combinación de este con fibras para el caso de la combinación del LDPE y PNFVU aprovechando la presencia del caucho tal y como se ha visto en otros estudios (Chiu et al., 2007).

Así en base a estos resultados, se podría decir que el uso de las distintas tipologías de betunes con polímeros reciclados estudiadas en esta tesis limitaría el problema del escurrimiento de las mezclas por lo que la aplicación de estas como elemento estructural en infraestructuras de transporte sin riesgo de este fenómeno.

4.1.6.3 Mezcla bituminosa tipo AC 22 S para infraestructuras ferroviarias.

El subbalasto bituminoso constituye una alternativa al subbalasto convencional como capa en la infraestructura de vías de ferrocarril, situándose sobre la superficie de la capa de forma de la plataforma y bajo la capa de balasto. En España el Pliego General de Prescripciones Técnicas tipo para los proyectos de Plataforma (PGP) establecido por ADIF (Administrador Infraestructuras Ferroviarias, 2011) plantea el empleo de dos tipos de mezclas para la fabricación de este tipo de capa, ambas del tipo hormigón bituminoso (AC) en dos tamaños máximos de árido: AC 22 S y AC 32 S y en tongadas de 12 cm.

Por otra parte, hoy en día uno de los aspectos clave que condiciona y cuestiona este tipo de material en ferrocarriles, es su susceptibilidad al deterioro y a la fisuración dado que su mantenimiento y reparación es mucho más compleja y costosa que en pavimentos para carreteras al encontrarse bajo el balasto. Así, en esta tesis doctoral, se plantea la alternativa del uso de una mezcla de altas prestaciones y considerada como antifisuras como la de tipo SMA. Además, dada esta característica, se plantea poder rebajar el espesor de la capa, de 12 cm a 6 cm. De este modo, en esta tesis se planteó una comparativa entre una de las soluciones planteadas por ADIF (AC 22 de 12 cm) así como la misma mezcla en un menor espesor (6 cm), y la mezcla tipo SMA desarrollada en las etapas anteriores de la investigación en una capa de 6 cm.

La granulometría de esta mezcla y sus límites granulométricos se incluyen en la Figura 64, estos están en consonancia con los comúnmente utilizados y recogidos en la norma UNE EN 13108-1. Dicha granulometría fue obtenida mediante la combinación de cuatro fracciones distintas de árido de naturaleza caliza: 18/25; 12/18; 6/12 y 0/6 cuyas características se incluyen en la Tabla 7. En relación al filler de aportación empleado este fue de nuevo el cemento.

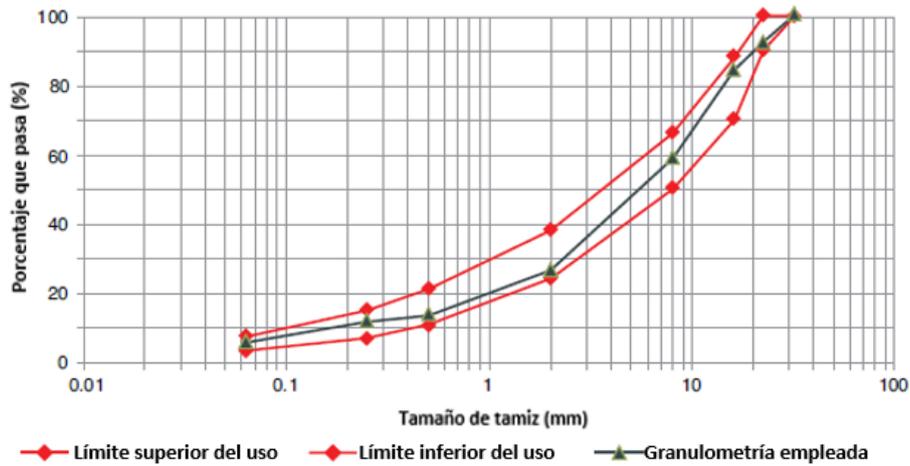


Figura 64. Granulometría de la mezcla AC 22 S empleada como subbalasto bituminoso.

En cuanto a los ligantes empleados, se utilizó el betún base empleado en la modificación y el ligante modificado de altas prestaciones específico para infraestructuras ferroviarias (PMB 20/30-63C) (Tabla 6). Junto a estos, se estudiaron los dos betunes modificados con polímeros reciclados de mejores prestaciones obtenidos de la evaluación de los mismos a distintas escalas (ligante, mortero y mezcla bituminosa). De nuevo en base a la experiencia previa con este tipo de mezclas, se eligió un contenido de ligante idéntico para las distintas mezclas estudiadas, en este caso del 4.25 % por peso total de mezcla.

Las mezclas fueron compactadas para un espesor de 6 cm (espesor mínimo establecido en Pliego General de Prescripciones Técnicas tipo para los proyectos de Plataforma (PGP) establecido por ADIF (Administrador Infraestructuras Ferroviarias, 2011). Las propiedades volumétricas de las distintas mezclas empleadas en este estudio se incluyen a continuación:

Tabla 11. Propiedades de las distintas mezclas estudiadas para su aplicación como subbalasto bituminoso.

Tipo de mezcla	AC 22 S B50/70	AC 22 S MAM	SMA 11 PMB 45/80-65 Fibras	SMA 11 LLDPE GEO	SMA 11 LDPE + PNFVU
Contenido de betún (% sobre total mezcla)	4.25	4.25	5.3	5.3	5.3
Densidad máxima (Mg/m ³)	2.643	2.598	2.796	2.795	2.729
Densidad aparente (Mg/m ³)	2.573	2.517	2.687	2.717	2.607
Contenido de huecos (%)	2.6	3.2	3.9	2.8	4.5
Contenido huecos en áridos (%)	13.2	13.6	17.7	16.8	17.9
Contenido huecos rellenos betún (%)	80.4	76.4	78.0	83.4	74.9
Estabilidad Marshall (kN)	13.3	11.7	12.7	10.5	8.8
Deformación Marshall (mm)	3.6	2.9	5.7	4.3	2.5

Se puede comprobar cómo las mezclas de referencia empleadas como subbalasto suelen tener un contenido de ligante menor, una densidad máxima y aparente algo más baja (fruto del empleo en exclusiva de áridos de naturaleza caliza) y suelen tener un contenido de huecos reducido que, si bien es algo menor al de las mezclas SMA que incorporan el ligante modificado en refinería y las fibras o la combinación del polietileno y el polvo de neumático reciclados, es del mismo orden que el obtenido para la mezcla que incorpora residuo de geomembrana.

De este modo, esta mezcla presentaría una capacidad de impermeabilización similar a las mezclas de referencia, mientras que el resto de SMA se mantienen en un nivel de huecos algo más elevado, pero dentro del rango entre 3-5 % recomendado en el Pliego General de Prescripciones Técnicas tipo para los proyectos de Plataforma (PGP) para el empleo de mezclas bituminosas como subbalasto (Administrador Infraestructuras Ferroviarias, 2011).

En relación a los valores de Marshall, el Pliego General de Prescripciones Técnicas tipo para los proyectos de Plataforma (PGP) para el empleo de mezclas bituminosas como subbalasto (Administrador Infraestructuras Ferroviarias, 2011) establece una estabilidad mínima de 10 kN y una deformación entre 2 y 4 mm como evaluación de la resistencia a las deformaciones permanentes. En este sentido, los betunes modificados con polímeros reciclados presentan unos valores próximos a esos límites, no obstante, la evaluación de la deformación a través del ensayo triaxial y la resistencia al punzonamiento permitirá precisar el comportamiento del material frente a este fenómeno.

4.1.6.4 Mezcla bituminosa tipo AC 22 S para pavimentos portuarios.

Como evaluación el modo en el que la adición de polímeros reciclados podía mejorar el comportamiento estructural de estos pavimentos, se decidió comparar las propiedades de una mezcla tipo AC 22 S, empleadas normalmente para este tipo de aplicación.

La granulometría de esta mezcla se incluye en la Figura 65 y esta fue obtenida mediante la combinación de cuatro fracciones distintas. Se emplearon áridos de naturaleza caliza para la fracción 18/25 y la fracción fina 0/6; mientras que para las fracciones 12/18 y 6/12 se emplearon áridos de naturaleza ofítica. Las características de estos áridos se incluyen en la Tabla 4. Como fíller se empleó el cemento. Por su parte, los límites granulométricos escogidos para esta mezcla están en consonancia con los comúnmente utilizados y recogidos en la norma UNE EN 13108-1.

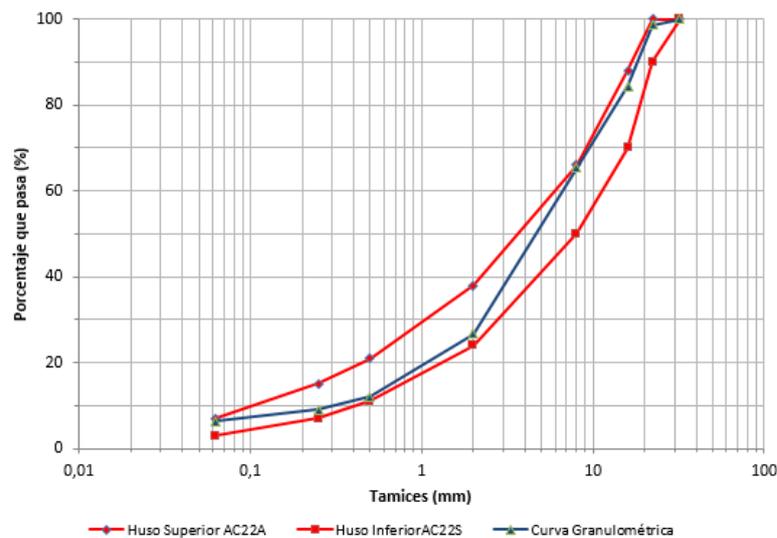


Figura 65. Granulometría de la mezcla AC 22 S ofita empleada como pavimento de puertos.

En cuanto a los ligantes empleados, estos fueron el ligante base empleado en la modificación (B 50/70), el ligante de alto módulo específico para pavimentos portuarias (PMB 20/50-75)(Tabla 6) y, al igual que en la evaluación del empleo como subbalasto, los dos betunes modificados con polímeros reciclados con mejor grado de desempeño en la evaluación a distintas escalas. El contenido de betún escogido para estas mezclas fue del 4.75% por peso total de mezcla en base a estudios anteriores de laboratorio.

En la Tabla 12 se muestran las propiedades volumétricas de las mezclas modificadas con polímeros reciclados (AC 22S B50/70 + 5% LLDPE GEO y AC 22S B50/70 + 5% LDPE + 10% PNFVU) así como las mezclas de referencia: la AC 22S fabricada con el betún base B 50/70 y la fabricada con el betún de altas prestaciones para uso en puertos.

Tabla 12. Propiedades de las distintas mezclas estudiadas para su aplicación como pavimento portuario.

Tipo de ligante	B50/70	Betún Puertos AP	B50/70 5% GEO LLDPE	B50/70 5% LLDPE + 10% PNFVU
Contenido de betún (% sobre total mezcla)	4.75	4.75	4.75	4.75
Densidad máxima (Mg/m ³)	2.715	2.664	2.630	2.622
Densidad aparente (Mg/m ³)	2.611	2.487	2.542	2.527
Contenido de huecos (%)	3.8	6.6	3.4	3.6
Contenido huecos rellenos betún (%)	75,9	63.5	77.8	76.3
Contenido huecos en áridos (%)	15.9	18.1	15.1	15.3
Estabilidad Marshall (kN)	11.6	21.1	13.3	13.4
Deformación Marshall (mm)	3.7	5.4	3.6	3.0

Se puede observar cómo la presencia de polímeros reduce en todos los casos la densidad de las mezclas con respecto al betún de penetración convencional (B50/70). Por otra parte, el empleo de los betunes modificados con polímeros reciclados (LLDPE GEO y LDPE + PNFVU) implica un contenido de huecos ligeramente inferior a la mezcla que emplea el betún específico de altas prestaciones para puertos y más similar a la mezcla de referencia. Este menor contenido de huecos puede ser interesante desde el punto de vista de su aplicación ya que el ambiente de humedad, agua salobre y presencia de combustibles típico de los puertos puede dañar a la mezcla en mayor grado si el acceso de estos agentes es más fácil a través de un contenido de huecos mayor.

En relación a los valores de Marshall, la adición de los polímeros reciclados da lugar a unas deformaciones similares a la mezcla que empleo el betún base, pero incrementa en ambos casos la estabilidad con respecto a este, aunque sin llegar a los valores de la mezcla fabricada con el betún modificado de referencia.

4.2 Plan de trabajo

Para la consecución de los distintos objetivos marcados se estableció un plan de ensayos dividido en varias fases y que se resume en el siguiente esquema:

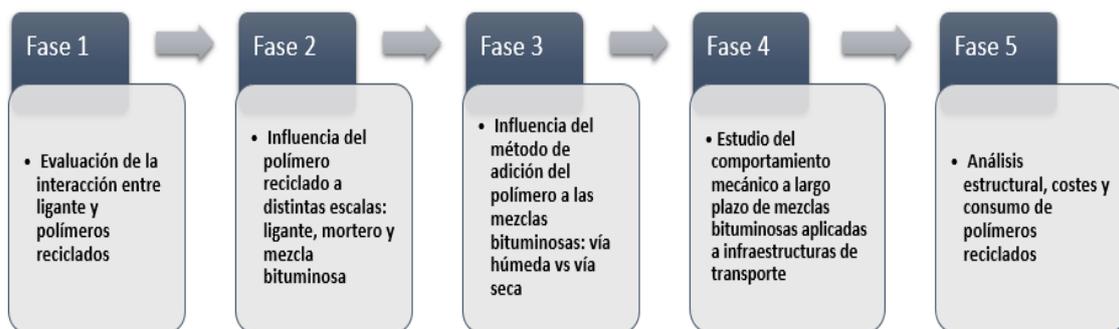


Figura 66. Esquema resumen del plan de trabajo.

En él se pueden apreciar cinco fases bien diferenciadas que responden a los objetivos planteados:

- La primera fase se centra en profundizar en el modo en el que las distintas variables referidas en el estado del arte (condiciones de mezclado, contenido y tipo de polímero) influyen la interacción entre el ligante y el polímero reciclado.

- La segunda, se refiere a la evaluación del grado en el que las propiedades mecánicas observadas en la etapa anterior son escalables a nivel de mortero y mezclas bituminosas. De este modo, es posible entender mejor el mecanismo de acción de cada polímero reciclado en la mezcla y seleccionar los más interesantes.
- Determinado el efecto sobre ligante, la tercera fase evaluó la posibilidad de emplear el polímero por vía seca. Con ello es posible comprobar si el empleo de esta técnica es capaz de obtener las mismas propiedades que la vía húmeda de una manera más sencilla de implementar en planta.
- Tras fijar el método óptimo de adición, en la cuarta fase se llevó a cabo un análisis del comportamiento mecánico a largo plazo de mezclas modificadas con polímeros reciclados aplicadas a distintas infraestructuras de transporte (carreteras, infraestructuras ferroviarias y puertos). Con ello, se evaluó la durabilidad y mejora estructural aportada por este tipo de soluciones, contribuyendo a aumentar la confianza en las mismas.
- Finalmente, en la última fase se realizó un análisis de dimensionamiento a partir de las mezclas estudiadas y se estudiaron los costes y el potencial consumo de materiales reciclados derivados, como medio para evaluar la viabilidad de las soluciones desarrolladas.

4.2.1. Evaluación de la interacción entre ligante y polímeros reciclados

Esta primera fase del estudio está centrada en la evaluación de la interacción entre el betún y los distintos polímeros reciclados y cómo esta se relaciona con las propiedades mecánicas finalmente obtenidas. Tal y como se ha referido en el estado del arte, existen distintos factores que influyen en dicha interacción. Por ello, una vez establecidas las condiciones de mezclado y el tamaño máximo de partícula en base a la revisión realizada, en este apartado se profundizó en los factores relativos a:

- Influencia del contenido de polímero incorporado.
- Influencia del tipo de polímero utilizado.

A la hora de evaluar dichas propiedades, se emplearon tanto ensayos convencionales (penetración, temperatura de reblandecimiento y viscosidad) como ensayos más específicos tales como el estudio de la microestructura del betún mediante microscopía de fuerza atómica (AFM), la estabilidad al almacenamiento o la evaluación de la resistencia al envejecimiento,

aspectos claves a la hora de evaluar el comportamiento a largo plazo de estos materiales. No obstante, en todas las etapas de esta primera fase del estudio estará presente el estudio de la reología del material como elemento clave para evaluar de forma precisa el modo en el que los distintos condicionantes influyen en la interacción betún/polímero.

El estudio de la reología es uno de los métodos más comúnmente empleados en la caracterización de ligantes y es habitual en aquellas investigaciones que analizan la modificación con polímeros y el envejecimiento del betún. Esta técnica permite caracterizar el betún a una cierta temperatura de acuerdo, tanto a su constitución (composición química), como a la estructura (plano físico) de las moléculas del material (Hunter, Self, Read, & Hobson, 2015).



Figura 67. Reómetro dinámico de corte (DSR) para la caracterización reológica de los ligantes.

4.2.1.1 Establecimiento de las condiciones de mezclado

En primer lugar, y de manera previa al estudio de la influencia del contenido de polímero y la tipología de este en la interacción con el betún, se fijaron las condiciones de mezclado en base al betún escogido (B 50/70) y la revisión realizada en el capítulo del estado del arte. De este modo, en relación a la temperatura de mezclado y tras pruebas preliminares de laboratorio, se estableció esta en 165 °C, una temperatura por debajo de la temperatura máxima de calentamiento del ligante (170°) y que se encuentra dentro del rango habitual empleado para la modificación con polietileno (Tabla 3). El proceso de mezclado se estableció originalmente para el betún que empleaba el polímero reciclado procedente del uso doméstico y fue, posteriormente, adaptado en duración para el ligante que combinaba este material con fibras (residuo de geomembrana) y con caucho (PNFVU).

En cualquiera de los casos, el betún era previamente calentado en estufa a la temperatura de modificación seleccionada, tras ello se incorporaba el polímero y este era movido con una espátula hasta que quedase totalmente cubierto por el betún. Tras esto, se comenzaba el proceso de agitación llevado a cabo mediante un agitador rotatorio de aspas (Figura 68) a una velocidad de 3500 rpm.



Figura 68. Mezclador de aspas empleado en la modificación.

Durante todo el proceso de mezclado (Figura 69) se mantiene la temperatura seleccionada controlando que esta no se incremente, lo que podría ocasionar el envejecimiento del ligante. Además, y para minimizar la oxidación, el recipiente empleado estaba cerrado en la parte superior salvo para el paso de la varilla de agitación, limitando la entrada de aire. El proceso de mezclado así fijado se continúa hasta alcanzar una mezcla homogénea en la que el polímero esté integrado en el betún. Los tiempos necesarios para alcanzar este estado dependen del tipo de polímero y porcentajes fijados



Figura 69. Esquema del proceso de mezclado empleado en la modificación de ligantes.

4.2.1.2 Influencia del contenido de polímero incorporado

Tras definir el proceso de modificación, en esta etapa se analizaron las variaciones debidas al empleo de distintas dosificaciones de polímero reciclado. Para establecer la comparativa, se empleó el polietileno reciclado procedente del consumo doméstico (LDPE) y atendiendo a las recomendaciones del estado del arte (Tabla 3), se escogieron como porcentajes de adición el 3%, 5% y 7% sobre el peso de ligante.

El trabajo realizado para analizar la influencia de distintos porcentajes de polímero reciclado sobre la interacción de este con el betún, queda recogido en la Tabla 13. Tras la realización de este plan se pudo establecer el contenido de polímero que serviría de referencia al estudiar la influencia del tipo de polímero reciclado analizada en la siguiente etapa.

Tabla 13. Plan de trabajo seguido para evaluar la dependencia del contenido de polímero reciclado en su interacción con el betún.

Ligantes	Propiedad estudiada	Ensayos	
3% LDPE	Penetración	- Ensayo de penetración ligantes a 25 °C (UNE EN-1426)	
	Temperatura de reblandecimiento	- Determinación del punto de reblandecimiento ligantes (UNE EN-1427)	
	Viscosidad a distintas temperaturas	- Viscosidad dinámica ligante a 135, 150, 165 y 180 °C (UNE EN 13302)	
	Estabilidad al almacenamiento	- Ensayo de estabilidad al almacenamiento de ligantes (UNE EN-13999)	
5% LDPE	Rigidez	- Barridos de frecuencia a distintas temperaturas (DSR)	<u>Variación de:</u> - Módulo complejo de rigidez (G*) - Ángulo de fase (δ) - Representación diagramas Black - Isocronas a 5 Hz
7% LDPE	Comportamiento viscoelástico		

4.2.1.3 Influencia del tipo de polímero empleado

Establecido el contenido de polímero para el polietileno lineal de baja densidad (LDPE), en esta fase se pasó a evaluar la influencia en la interacción con el betún del empleo de distintos tipos de polietileno: el LDPE procedente del reciclaje doméstico empleado en la fase anterior, LLDPE procedente de geomembrana y la combinación de LDPE y PNFVU.

En relación al material procedente de geomembrana (LLDPE GEO) se estableció un contenido óptimo como el fijado para el LDPE procedente del reciclado doméstico, considerando que ambos tienen una naturaleza similar. En relación al tamaño, la disgregación del polímero y la potencial separación de capas obligó a establecer un máximo de 5 mm.

Por otra parte, para la evaluación del empleo conjunto de plastómeros y elastómeros se fijó un contenido de PNFVU del 10% (contenido habitual de acuerdo a la revisión del estado del arte, Tabla 3) a combinar con el contenido óptimo de LDPE previamente fijado. Para esta última modificación, se introdujo durante el proceso de mezclado una pequeña variante. Considerando la diferencia de densidad entre plastómero (LDPE) y elastómero (PNFVU) (en torno al 10%), ambos eran mezclado entre sí previo a su adición al betún (Figura 70). De este modo, se garantizaba un mezclado homogéneo de los distintos componentes desde el inicio del proceso de mezclado.

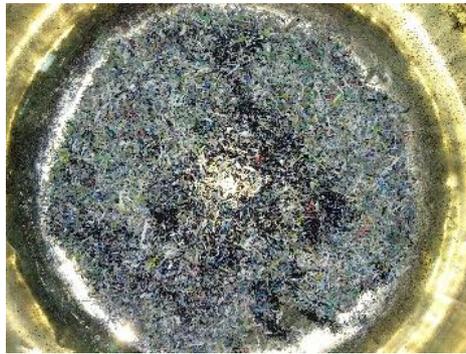


Figura 70. Mezclado previo polietileno (LDPE) y polvo de caucho (PNFVU).

Su empleo contribuye a la mejora de las propiedades mecánicas de la mezcla en lo referente a susceptibilidad al agua, mejorando la resistencia a deformaciones plásticas a altas temperaturas y reduciendo la susceptibilidad térmica de las mezclas (Moreno-Navarro, 2014) y el riesgo de escurrimiento de ligante que se puede producir en mezclas discontinuas y mezclas tipo SMA (Stone Mastic Asphalt), ambas habituales en capas de rodadura de altas prestaciones. De igual modo, y para solventar en cierta medida la fragilidad de la mezcla a bajas temperaturas (derivada del incremento de rigidez obtenido con los plastómeros), la combinación del polietileno con el PNFVU es una alternativa interesante, máxime si consideramos que mediante el uso de este material también se logra la reducción del riesgo de escurrimiento de ligante (Chiu & Lu, 2007).

Se incluye además en este paso, el estudio de la microestructura de los betunes como medio para evaluar los efectos de la adición de los polímeros reciclados en la misma y cómo esto puede influir en el comportamiento mecánico de los ligantes. De esta forma, fue posible relacionar las propiedades mecánicas obtenidas mediante el empleo de los polímeros reciclados con la interacción que se produce entre estos y el betún. Para ello, se empleó un microscopio de fuerza atómica (AFM) (Figura 71).

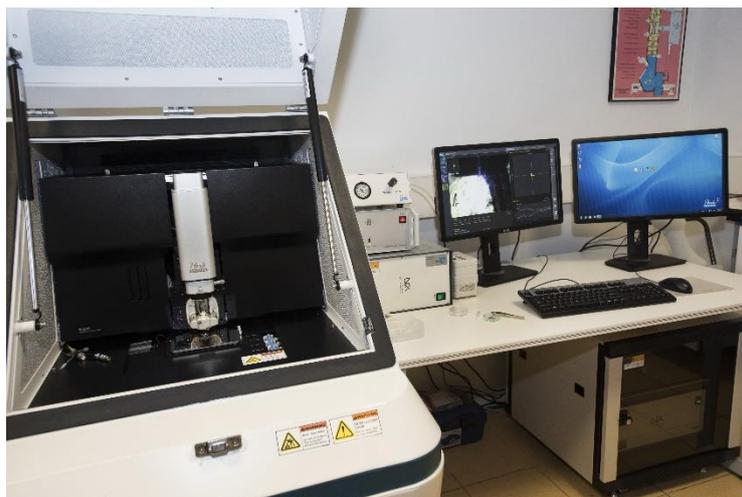


Figura 71. Equipo de microscopía de fuerza atómica (AFM).

Para la evaluación de la influencia de los distintos tipos de polímeros, se establecieron en esta etapa tres actividades a completar:

- La evaluación de la influencia del tipo de polímero en la interacción con el betún tras el proceso de modificación. En este sentido es de especial importancia primero, la estabilidad al almacenamiento del material que garantiza su aplicabilidad y, segundo, el estudio reológico que permite determinar con precisión sus propiedades.
- El análisis de la evolución de dicha interacción con el paso del tiempo, a través de la caracterización de los betunes modificados con polímeros reciclados y los betunes de referencia tras el envejecimiento.
- La aplicación de una nueva metodología de análisis reológico basada en el ensayo MSCR que complementa (mediante la consideración de la elasticidad del ligante) la evaluación de la interacción entre polímero y betún para distintas condiciones ambientales y de envejecimiento.

Evaluación de la influencia del tipo de polímero en la interacción con el betún tras el proceso de modificación

Después de fabricar los distintos ligantes modificados con polímeros reciclados (LDPE, LLDPE GEO y LDPE + PNFVU) de acuerdo al proceso establecido en la etapa anterior, el primer paso para la evaluación de su capacidad de mejorar la capacidad estructural de materiales bituminosos consistió en el estudio de la variación de propiedades mecánicas con respecto al betún base y al betún modificado de referencia (PMB 45/80-65). Tras garantizar la estabilidad al almacenamiento de las distintas soluciones, se estudiaron las propiedades básicas para, después, profundizar en su comportamiento a través del estudio de su reología. Junto a esto, se evaluó la microestructura de estos ligantes como medio para relacionar las propiedades

mecánicas observadas con esta. En la siguiente tabla se muestra el plan de trabajo seguido para la evaluación de la influencia del tipo polímero en la interacción entre este y el betún tras la fabricación de los ligantes modificados:

Tabla 14. Plan de trabajo seguido para evaluar la influencia del tipo de polímero reciclado en su interacción con el betún tras la fabricación del ligante modificado.

Ligantes	Propiedad estudiada	Ensayos	
Betún base (B50/70)	Penetración	- Ensayo de penetración ligantes a 25 °C (UNE EN-1426)	
	Temperatura de reblandecimiento	- Determinación del punto de reblandecimiento ligantes (UNE EN-1427)	
PMB 45/80-65	Índice de penetración		
B50/70 + LDPE	Viscosidad a distintas temperaturas	- Viscosidad dinámica ligante a 135, 150, 165 y 180 °C (UNE EN 13302)	
	Estabilidad al almacenamiento	- Ensayo de estabilidad al almacenamiento de ligantes (UNE EN-13999)	
B50/70 + LLDPE GEO	Rigidez del material	- Barridos de frecuencia a distintas temperaturas (DSR)	<u>Variación de:</u> - Módulo complejo de rigidez (G*)
B50/70+ LDPE + PNFVU	Comportamiento viscoelástico del material		- Ángulo de fase (δ) - Representación diagramas Black - Isocronas a 5 Hz
	Susceptibilidad térmica ligante		- S 25-60
Betún base (B50/70)	Interacción química con propiedades mecánicas	- Microscopía de fuerza atómica (AFM)	<u>Variación de:</u>
B50/70 + LDPE			- Imágenes topográficas
B50/70 + LDPE + PNFVU			- Imágenes de fase

Evaluación de la influencia del tipo de polímero en la interacción con el betún a largo plazo. Resistencia al envejecimiento.

Es importante a la hora de estudiar el comportamiento de un modificador del ligante y su interacción con el mismo, no únicamente evaluar su grado de desempeño tras su empleo en mezclas, sino también analizar la evolución de sus propiedades durante toda su vida útil, prestando especial atención a cómo el envejecimiento puede llegar a afectar al mismo. Esto constituirá un factor clave a la hora de proporcionar garantías acerca de la durabilidad de este tipo de materiales. Por este motivo, los distintos betunes modificados (LDPE, LLDPE geomembrana y LDPE + PNFVU) y los dos betunes de referencia (betún base y betún modificado

con polímeros comercial) fueron sometidos a ensayos para reproducir en laboratorio su envejecimiento a corto plazo (RTFOT, UNE EN-12607-1) y a largo plazo (PAV, UNE EN-14769).



Figura 72. Equipos RTFOT (derecha) y PAV (izquierda) empleados en el envejecimiento de los ligantes.

Una vez envejecidos los ligantes, se repitió la batería de ensayos de caracterización estableciendo distintos índices de envejecimiento en relación con las propiedades básicas de los mismos (penetración, temperatura de reblandecimiento y viscosidad), antes y después de este proceso, como una primera medida de evaluación de la resistencia a la oxidación.

Junto con esto, también se volvió a analizar la microestructura de los distintos ligante mediante la microscopía de fuerza atómica (AFM). Su uso está extendido a la hora de evaluar este fenómeno (Tauste et al. 2018b) y resulta de utilidad para comprobar la degradación y evolución de la interacción física y química de los componentes del ligante.

En lo referente la caracterización reológica se emplearon las mismas condiciones empleadas en el estudio previo al envejecimiento. No obstante, junto a la variación de la rigidez y comportamiento visco-elástico del material, se incluyó la evaluación de índices reológicos específicos destinados a evaluar la fragilidad del betún a bajas temperaturas: R-value, Crossover-Frequency y Glove-Rowe parameter. Una descripción de los mismos se puede consultar en el Anexo I de la presente tesis doctoral.

De este modo, el plan de trabajo empleado en esta fase del estudio de la influencia del tipo de polímero en la interacción entre polímero reciclado y ligante se puede consultar en la Tabla 15.

Tabla 15. Plan de trabajo seguido para evaluar la influencia del tipo de polímero reciclado en su interacción con el betún tras su envejecimiento.

Ligantes	Propiedad estudiada	Ensayos	
Betún base (B50/70)	Variación penetración	- Ensayo de penetración ligantes a 25 °C (UNE EN-1426)	
PMB 45/80-65 B50/70 + LDPE	Variación temperatura reblandecimiento	- Determinación del punto de reblandecimiento ligantes (UNE EN-1427)	
B50/70+ LLDPE GEO B50/70 +LDPE + PNFVU	Variación de viscosidad a la temperatura de trabajo del ligante	- Viscosidad dinámica ligante a 165 °C (UNE EN 13302)	
Betún base (B50/70) PMB 45/80-65 B50/70 + LDPE	Variación rigidez del material Variación comportamiento viscoelástico del material	- Barridos de frecuencia a distintas temperaturas (DSR)	<u>Variación de:</u> - Módulo complejo de rigidez (G*) - Ángulo de fase (δ) - Representación diagramas Black - Isocronas a 5 Hz
B50/70 LLDPE GEO B50/70 + LDPE + PNFVU	Resistencia al envejecimiento y a la fisuración a bajas temperaturas		- R- value - Crossover-frequency - Glove-Rowe parameter
Betún base (B50/70) B50/70 + LDPE B50/70 + LLDPE GEO B50/70+ LDPE + PNFVU	Interacción química con propiedades mecánicas	- Microscopía de fuerza atómica (AFM)	<u>Variación de:</u> - Imágenes topográficas - Imágenes de fase

Análisis MSCRT para distintas condiciones ambientales

Por último y como medio para completar la evaluación de la influencia del polímero en las propiedades del ligante, se aplicó el ensayo de Multiple Stress Creep and Recovery (UNE EN 16659) evaluando la recuperación elástica de los distintos ligantes y su resistencia a las deformaciones permanentes a altas temperaturas.

Junto a la metodología clásica de ensayo, y como medida para completar la evaluación del efecto de la temperatura y el envejecimiento en la interacción entre polímero reciclado y betún, se empleó en este caso la nueva metodología de ensayo reológico (Moreno-Navarro, Tauste, Sol-

Sánchez, & Rubio-Gámez, 2019) la cual permite precisar el análisis reológico previamente realizado y aplicarlo a ligante envejecidos. Dicha metodología no introduce cambios operativos en el ensayo habitual de MSCR (UNE EN 16659) realizándose en este caso a 3.2kPa y tres condiciones: 45°C, 70°C y 45°C tras envejecimiento mediante RTFOT+PAV.

Los distintos parámetros analizados mediante esta metodología se recogen en la Tabla 16. Un resumen de la misma, así como la descripción de los distintos índices, puede encontrarse en el Anexo I de la presente tesis doctoral.

Tabla 16. Parámetros analizados mediante la aplicación del análisis MSCRT al estudio de la interacción entre polímero y betún.

Ligantes	Propiedad estudiada	Parámetro o índice de la nueva metodología	
Betún base (B50/70)	Resistencia a las deformaciones permanentes a altas temperaturas	- Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) (UNE EN 16659)	<u>Variación de:</u>
	Recuperación elástica del ligante		- Jnr 3200 Pa - % Reparación elástica
PMB 45/80-65	Evaluación del comportamiento del ligante frente a la deformación	- Metodología de análisis MSCRT LabIC.UGR (Moreno-Navarro et al. 2019)	- Non-Recoverable Strain Rate, $\Delta\epsilon_{nr}$ (%/ciclos)
			- Average Recovered Strain, RS_{15-30} (%/ciclos)
B50/70+LDPE	Capacidad de deformación del ligante frente a carga		- Flow index (F)
	Cuantificación de la elasticidad del ligante		- Recovery Capacity (RC)
B50/70+LLDPE GEO	Durabilidad del ligante frente a la aplicación de cargas		- L-index
	Susceptibilidad a la temperatura del ligante		- T-index
B50/70 + LDPE + PNFVU	Susceptibilidad al envejecimiento del ligante		- A-index
	Susceptibilidad del ligante frente a las condiciones ambientales		- AM-index

4.2.2. Impacto del polímero reciclado a distintas escalas: ligante, mortero y mezcla bituminosa

Una vez determinadas las propiedades mecánicas aportadas por los distintos tipos de polímeros, en esta fase del estudio se buscó determinar el grado en el que los beneficios aportados por la modificación con polímeros reciclados son extrapolables primero, a nivel del mortero bituminoso y, después, en su aplicación a una mezcla de altas prestaciones que habitualmente incorpore este tipo de ligantes como la mezcla tipo SMA 11.

Para ello, en primer lugar, se llevó a cabo el diseño de los morteros y la mezcla bituminosa con los contenidos óptimos de los distintos polímeros reciclados (LDPE de origen doméstico, LLDPE de geomembrana y LDPE + PNFVU) comparando con el betún base y un ligante modificado comercial (PMB 45/80-65). Tras ello, se estableció una comparativa acerca del grado en el que distintas propiedades mecánicas se ven afectadas por la adición de los distintos polímeros a distintos niveles. De este modo, es posible determinar de manera global los polímeros que mejor actúan en la mejora estructural de materiales bituminosos.

4.2.2.1 Aplicación de ligantes modificados con polímeros reciclados a morteros bituminosos. Análisis DMA.

Tras caracterizar el comportamiento de los ligantes modificados como tales, y como paso previo al análisis de las propiedades mecánicas que estos aportan a las mezclas bituminosas, en esta sección se introdujo el estudio de un nivel intermedio entre el betún y la mezcla bituminosa, el mortero bituminoso.

Este tipo de análisis permite evaluar la acción conjunta del ligante junto con el polvo mineral empleado y la fracción más fina de los áridos. Aspectos tan importantes como la adhesividad entre los áridos y el ligante (condicionada por la forma en la que ambos se relacionan como un conjunto a través del filler) o la cohesión de las mezclas, es decir, el poder aglomerante del ligante, se ven influenciadas de manera significativa por este material. En la Tabla 17 se incluye un resumen acerca de los trabajos realizados en esta actividad.

Tabla 17. Plan de ensayos realizado para la evaluación del comportamiento mecánico de morteros modificados con polímeros reciclados.

Mortero	Propiedad estudiada	Ensayos	
Betún base (B 50/70) PMB 45/80-65	Determinación rango viscoelástico lineal	Barrido de amplitudes con DMA	
	Rigidez del material	Ensayo de fatiga en tres puntos con DMA:	Variación de: - Módulo complejo de rigidez (G^*) - Ángulo de fase (δ) - Ciclos hasta fallo del material - Susceptibilidad a la humedad
Comportamiento viscoelástico del material			
Resistencia a la fatiga del material			
B 50/70 + LDPE	Comportamiento frente a la humedad		
B50/70 + LDPE GEO			
B50/70 LDPE + PNFVU			

Para la determinación de las propiedades viscoelásticas de los morteros se empleó un equipo DMA (Dynamic Mechanical Analyzer) ensayando la fatiga de probetas prismáticas fabricadas con

morteros mediante flexión en tres puntos (Figura 73). Este tipo de dispositivo es capaz de aportar información relativa a las propiedades visco-elásticas de los materiales bituminosos de manera similar a los análisis realizados sobre ligantes mediante reómetros dinámicos de corte (DSR). Además, este equipo permite evaluar otros modos de aplicación de carga (como la flexión en tres puntos) o analizar distintas configuraciones de muestras (másticos, morteros, etc.). Una descripción de los ensayos de realizados sobre los morteros bituminosos se incluye en el Anexo I de la presente tesis doctoral.



Figura 73. Equipo DMA empleado en la caracterización de los morteros bituminosos.

4.2.2.2 Aplicación de ligantes modificados con polímeros reciclados a mezclas bituminosas

Tras escalar el efecto a nivel de mortero, y con el fin de evaluar el efecto de los distintos polímeros (LDPE, LLDPE GEO y LDPE + PNFVU) sobre las propiedades mecánicas de la mezcla bituminosa, se diseñaron mezclas de tipo SMA 11 que los incorporaran en su dosificación óptima. Dichas mezclas se compararon con las fabricadas a partir del betún base y también con el betún modificado en refinería de referencia.

En este último caso, y para la caracterización de la fórmula de trabajo (la relativa a la sensibilidad al agua, módulo de rigidez y evaluación de deformaciones permanentes) se estudiaron dos posibles soluciones: una que empleaba el ligante como tal y otra que incorporaba fibras acrílicas en un 0.3% por peso de mezcla (un porcentaje habitual para el empleo de fibras (Moreno-Navarro et al. 2014), para evitar el posible escurrimiento y establecer la comparativa con las soluciones de residuo de geomembrana y LDPE + PNFVU.

Junto con los ensayos anteriores destinados a definir el diseño de la mezcla, se llevó a cabo también para el betún base, los ligantes modificados con polímeros (LDPE, LLDPE GEO y LDPE +

PNFVU) y la solución con ligante modificado en refinería qué mejor comportamiento presentó durante el diseño (con o sin fibras), el ensayo de resistencia a la fisuración por fatiga UGR – FACT (Moreno-Navarro et al. 2013)

Este se realizó para una carga constante de 0.4 kN (correspondiente a una presión de 330 kPa) aplicada a 5Hz (de modo que coincidiese con las isocronas del ligante y la frecuencia de ensayo de los morteros) y tres temperaturas distintas (10, 20 y 30 °C) con el objetivo de caracterizar la susceptibilidad térmica de las distintas mezclas y cómo esta influye en la fisuración de las mismas. De esta forma, fue posible establecer leyes de fatiga a partir de las cuales se puede establecer una comparativa entre la resistencia a nivel de mortero y a nivel de mezcla.

El diseño de las mezclas fue realizado de acuerdo con el método Marshall y, a fin de aislar otras posibles variables, se estableció un contenido fijo de betún. A la hora de determinar dicho contenido, se escogió un porcentaje del 6.3 % por peso de mezcla, un contenido habitual para este tipo de mezclas. No obstante, se aplicó el coeficiente de corrección por la densidad de los áridos a emplear fijado en la norma UNE EN-13108-5, con lo que el porcentaje finalmente seleccionado fue del 5.3% sobre el peso total de mezcla.

En la Tabla 18 se incluye un resumen del plan de trabajo llevado a cabo para el diseño y caracterización de las distintas mezclas bituminosas. Los ensayos recogidos se encuentran definidos en el Anexo I de la presente tesis doctoral.

Tabla 18. Plan de trabajo seguido para el diseño y caracterización mecánica de mezclas SMA 11 con polímeros reciclados.

Mezcla	Propiedad estudiada	Ensayos
Betún base (B50/70)	Susceptibilidad a la acción del agua	- Ensayo de sensibilidad al agua (UNE EN 12697-12)
PMB 45/80-65 + Fibras B50/70 + LDPE	Rigidez del material a distintas temperaturas	- Ensayo rigidez de mezclas bituminosas (UNE EN 12697-26 Anexo C) a 5, 20 40 °C
B50/70 + LLDPE GEO B50/70+ LDPE + PNFVU	Resistencia a deformaciones permanentes	- Ensayo de rodadura (UNE EN 12697-22)
Betún base Betún modificado en refinería Betunes modificados con polímeros reciclados	Resistencia a la fisuración por fatiga y susceptibilidad térmica	- Ensayo UGR-FACT(0,4 kN; 5Hz; 10, 20, 30 °C)

4.2.2.3 Comparativa del efecto del empleo de polímeros reciclados a distintas escalas de la mezcla bituminosa

Tras caracterizar las propiedades mecánicas aportadas por la incorporación de polímeros reciclados en los distintos niveles de la mezcla bituminosas (ligante, mortero y mezcla completa), en esta etapa, se realizó una comparativa de distintas propiedades mecánicas comunes a los tres niveles de caracterización. De esta forma es posible evaluar mediante la comparativa con los ligantes de referencia (el betún base empleado en la modificación y el betún modificado en refinería) el grado en el que dichas propiedades son transmitidas desde la concepción del ligante modificado con polímeros reciclados hasta su aplicación final en mezclas bituminosas, facilitando una herramienta para evaluar la efectividad de las distintas soluciones. En la Tabla 19 se pueden observar las distintas comparativas llevadas a cabo.

Tabla 19. Propiedades comparadas para determinar la aportación de los polímeros reciclados a distintas escalas de la mezcla.

Escala	Ligantes	Mortero	Mezcla bituminosa
Ensayos empleados	Barrido de frecuencias y MSCRT	Fatiga a tres puntos (DMA)	Rigidez/Sensibilidad Agua/Rodadura/ UGR-FACT
Propiedad comparada	Rigidez del material (G*)	Rigidez del material (G*)	Rigidez del material (MPa)
	Ángulo de fase	Ángulo de fase	-
	-	Resistencia a la humedad (Módulo Conservado)	Resistencia humedad (ITSR)
	L-Index		Profundidad de rodera (mm)
	-	Ciclos hasta fallo (Fatiga)	Ciclos hasta fallo (UGR-FACT)

Con el fin de que la comparativa entre variables fuese lo más precisa posible, los datos de rigidez, ángulo de fase y resistencia a la fatiga fueron comparados en términos de las condiciones de ensayo a las que se realiza el mortero, es decir, para una temperatura de 35 °C y una frecuencia de aplicación de la carga de 5 Hz. Así, los datos de ligantes fueron obtenidos de las isocronas a 5 Hz elaboradas en la etapa anterior del estudio, mientras que las curvas de módulo y las leyes de fatiga de UGR-FACT a distinta temperatura permitieron obtener los valores a nivel de mezcla bituminosa. De este modo, se limitan las variables comparadas y se puede evaluar con mayor precisión la evolución del efecto de los polímeros reciclados a las distintas escalas.

De igual modo, aprovechando el uso del mismo tipo de acondicionamiento, se analizó la diferencia entre la conservación de propiedades mecánicas (módulo para el mortero y tracción indirecta para la mezcla) ante la acción del agua, evaluando la adhesividad entre áridos y ligantes modificados con polímeros reciclados a distintos niveles. Por último, los ensayos de rodadura a

nivel de mezcla y la metodología LabIC.UGR de ensayo MSCRT sirvieron para comparar la resistencia a la deformación permanente a distinta escala.

4.2.3. Influencia del modo de adición del polímero reciclado en las características de las mezclas bituminosas: vía húmeda vs vía seca

Constatado el efecto de los distintos polímeros reciclados aplicados a la mezcla bituminosa a través de la modificación del ligante (vía húmeda), en esta etapa del estudio, se analizó para el plastómero de referencia (LDPE) la posibilidad del empleo de los polímeros por vía seca en mezclas tipo SMA. De este modo, se busca explorar la posibilidad de obtener las mismas propiedades mecánicas del ligante modificado sin la necesidad de introducir en planta el mezclado previo del ligante y el polímero, lo que simplificaría la incorporación del polímero reciclado a las mezclas.

En la fabricación de la mezcla por vía seca, el polímero (con un contenido igual al establecido para la vía húmeda) fue incorporado como si de un aditivo se tratase, mezclado con los áridos durante 30 segundos de manera previa a la incorporación del betún. La incorporación como aditivo en lugar de como sustituto del árido busca delimitar las variables de comparación a la forma de incorporar el polímero, sin que el esqueleto mineral o el contenido efectivo del mismo se vea afectado. Tras fabricar las distintas mezclas, se hizo uso del análisis de densidades (UNE EN 12697-6), huecos (UNE EN 12697-8) y evolución de las curvas de compactibilidad obtenidas mediante el empleo de un compactador giratorio (Figura 74) con un número fijo de giros de 210 para establecer el mejor método de adición.



Figura 74. Compactador giratorio empleado en el análisis de trabajabilidad.

Junto a esto, se realizó una comparativa en los resultados de resistencia a la tracción indirecta a 25°C (UNE-EN 12697-23) entre probetas fabricadas por vía húmeda y seca para un contenido análogo de huecos. Este ensayo permite evaluar la diferencia entre la interacción betún-árido comparando la envuelta de los áridos obtenida por uno u otro sistema. En la Tabla 20 se incluye un resumen del plan de trabajo seguido para el desarrollo de esta etapa del estudio:

Tabla 20. Plan de trabajo realizado para la evaluación de la influencia del modo de adición del polímero reciclado.

Mezcla	Propiedad estudiada	Ensayos
SMA 11 Betún base (B50/70) SMA 11 LDPE Vía húmeda SMA 11 LDPE Vía Seca	Trabajabilidad y compactibilidad de la mezcla	- Curvas de compactación con giratoria (210 giros)
		- Determinación densidad aparente (UNE EN 12697-6)
		- Determinación densidad máxima (UNE EN 12697-5)
		- Determinación contenido de huecos (UNE EN 12697-8)
	Interacción entre árido y ligante	- Ensayo de tracción indirecta a 25°C (UNE EN 12697-23)

En función de estos resultados, se fijó el método de adición de los polímeros reciclados más adecuado para la posterior evaluación del comportamiento estructural y a largo plazo de las mezclas que los incorporen y que serían empleadas para la mejora estructural de distintos tipos de infraestructuras de transporte.

4.2.4. Estudio del comportamiento mecánico a largo plazo de mezclas bituminosas modificadas con polímeros reciclados aplicadas a distintas infraestructuras de transporte

Habiendo definido el método óptimo de incorporación de los polímeros reciclados a la mezcla bituminosas, en esta fase se analiza la capacidad de estas mezclas para mejorar el comportamiento mecánico a largo plazo de distintas infraestructuras de transporte, analizando principales modos de fallo de cada una que condicionan su capacidad estructural, de manera que se pudiese garantizar la adecuada respuesta de este tipo de materiales comparando con las soluciones actualmente empleadas.

De este modo, la mezcla SMA 11 diseñada anteriormente sería evaluada para su uso en pavimentos de carreteras, así como para su empleo como subbalasto bituminoso como solución alternativa a la tradicional AC 22 S de mayor espesor de capa. De igual forma, también se evaluó el uso de los polímeros reciclados para una mezcla tipo AC 22 S empleada en pavimentos portuarios.

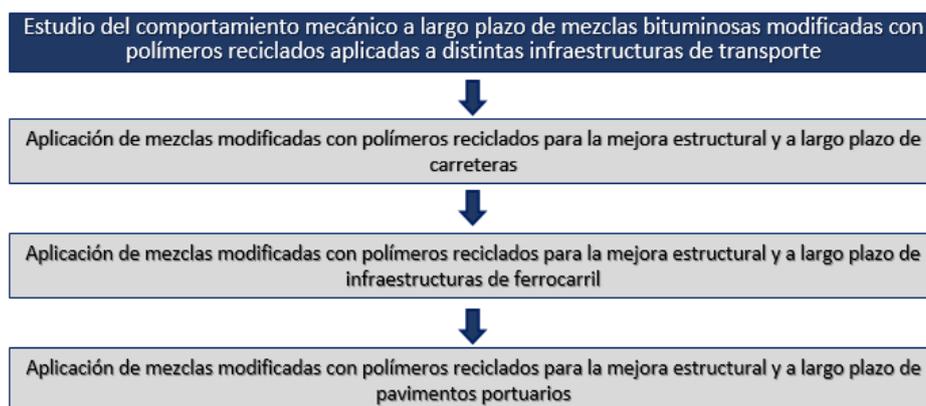


Figura 75. Esquema de las distintas etapas seguidas para la evaluación de comportamiento mecánico a largo plazo de mezclas bituminosas modificadas con polímeros reciclados.

4.2.4.1 Aplicación de mezclas con polímeros reciclados para la mejora estructural y a largo plazo de carreteras

La primera de las soluciones estudiada se refiere a la utilización de los distintos polímeros para la fabricación de mezclas asfálticas tipo SMA para capa de rodadura que logren extender el empleo de mezclas de altas prestaciones a un mayor número de vías.

Sumado al conjunto de ensayos realizados en la fase de estudio de la reproducibilidad del efecto de los polímeros reciclados a distintas escalas, se suma aquí la realización de dos ensayos destinados a evaluar la resistencia a largo plazo del material estudiado: el ensayo UGR-FACT (Moreno-Navarro & Rubio-Gámez, 2016) a distintas cargas y la evaluación del envejecimiento de la mezcla mediante el ensayo SATS (UNE EN 12697-45).

Tabla 21. Plan de trabajo desarrollado para el estudio del comportamiento mecánico a largo plazo de mezclas con polímeros reciclados aplicadas en capa de rodadura.

Mezcla	Propiedad estudiada	Ensayos	
SMA 11 Betún base (B 50/70)	Resistencia a la fisuración por fatiga a distintos niveles de carga	- Ensayo UGR-FACT a 20°C, 5Hz, y 0,1 kN 0,2 kN 0,4 kN	<u>Variación:</u>
SMA 11 PMB 45/80-65 Fibras			- Ciclos hasta fallo
SMA 11 B50/70 + LDPE			- Deformación horizontal inicial
SMA 11 B50/70+ LLDPE GEO	Susceptibilidad de la mezcla a la humedad y al envejecimiento	- Ensayo rigidez a tracción tras acondicionamiento en saturación (SATS) (EN 12697-45)	- Parámetro medio de daño (γ)
SMA 11 B50/70 + LDPE + PNFVU			<u>Variación:</u>
			- Módulo rigidez a 20 °C
			- Saturación del material

El ensayo UGR-FACT (Moreno-Navarro et al., 2013), tal y como se ha referido anteriormente, permite estudiar uno de los principales problemas que dan lugar al fallo de las mezclas bituminosas y que, por tanto, condicionan su vida de servicio: la fisuración por fatiga de las mismas. En este caso, se ensayaron tres niveles distintos de carga: 0.1, 0.2 y 0.4 KN (correspondientes a unas presiones del orden de 80, 165 y 330 kPa respectivamente) y a una frecuencia de 5 Hz para poder crear leyes de fatiga que permitieran establecer el comportamiento del material frente la acción de distintos niveles de tráfico, comprobando así su capacidad estructural.

El otro factor clave a considerar al evaluar la vida de servicio de las mezclas estudiadas es su respuesta frente al envejecimiento. Al igual que se realizó a nivel de ligante, en esta etapa se evalúa la resistencia a dicho fenómeno, en esta ocasión, tras la interacción del betún con el resto de componentes de la mezcla. Para ello, se utilizó el ensayo SATS (UNE EN 12697-45), el primer ensayo en combinar tanto el daño por envejecimiento como el debido a la humedad. Para ello, la mezcla bituminosa se acondicionan probetas de mezcla bituminosa presaturadas en condiciones de humedad a una elevada temperatura y presión (Zhang, Airey, Grenfell, & Apeageyi, 2018). Una descripción de este procedimiento de ensayo se incluye en el Anexo I de la presente tesis doctoral.

4.2.4.2 Aplicación mezclas con polímeros reciclados para la mejora estructural y a largo plazo de infraestructuras ferroviarias

En este apartado se evaluó la posibilidad de emplear mezclas análogas a las anteriores en las infraestructuras ferroviarias a través de su incorporación como subbalasto bituminoso.

De este modo y como referencia, se estudia una mezcla tipo AC 22 S fabricada con un betún de penetración convencional como el empleado en la modificación (en su espesor habitual de 12 cm y el correspondiente a la reducción objetivo, 6 cm), y con un betún de altas prestaciones modificado en refinera (Tabla 6) para mezclas de elevada rigidez y alta capacidad portante. Las propiedades de estas mezclas fueron comparadas con las de las dos mezclas tipo SMA 11 de mejores prestaciones mecánicas de entre las que incorporan polímeros reciclados para su empleo en carreteras, así como con la mezcla fabricada con el betún modificado de referencia y fibras (SMA 11 PMB 45/80-65 + 0.3% Fibras) para evaluar la posible reducción de espesor.

Tabla 22. Plan de trabajo desarrollado para el estudio del comportamiento mecánico a largo plazo de mezclas con polímeros reciclados aplicadas como subbalasto bituminoso.

Mezcla	Propiedad estudiada	Ensayos	
AC 22 Betún base (12 cm)	Susceptibilidad a la acción del agua	- Ensayo de sensibilidad al agua (UNE EN 12697-12)	
AC 22 Betún base (6 cm)	Rigidez del material	- Ensayo rigidez (UNE EN 12697-26 Anexo C) a 5, 20 y 40 °C	
	Resistencia a deformaciones permanentes	- Ensayo de compresión triaxial cíclica (UNE EN 12697-25)	
AC 22 Betún altas prestaciones (6 cm)	Resistencia al punzonamiento	- Ensayo de punzonamiento para subbalasto bituminoso	<u>Variación:</u> - Evolución deformación
SMA 11 modificadas con polímeros reciclados (6 cm)			- Índice punzonamiento a corto plazo - Índice punzonamiento a largo plazo
SMA 11 PMB 45/80-65 Fibras (6 cm)	Resistencia a la fisuración por fatiga a distintos niveles de carga	- Ensayo UGR-FACT a 20°C, 5Hz, y 0,5 kN; 0,75 kN; 1 kN	<u>Variación:</u> - Ciclos hasta fallo - Deformación inicial - Parámetro medio de daño (γ)

En base a experiencias previas de diseño y con el objetivo de minimizar las variables de estudio, se fijó un contenido de betún para las distintas mezclas estudiadas. Así se fijó un contenido óptimo del 5.3 % por peso de mezcla, para la mezcla tipo SMA 11 y del 4.25% para la mezcla tipo AC 22S.

Con el objetivo de garantizar la aplicabilidad de estas mezclas, además de los ensayos ya incluidos en la etapa de diseño de la mezcla SMA 11 (sensibilidad al agua (UNE EN 12697-12) y módulo de rigidez (UNE EN 12697-26 Anexo C), se incluye en esta ocasión el ensayo de compresión triaxial para la evaluación de deformaciones permanentes (UNE EN 12697-25). Este último fue escogido en lugar del ensayo de rodadura (UNE EN 12697-22), el cual simula el paso del tráfico rodado en carreteras, por guardar mayor relación con el tipo de esfuerzos a los que se ve sometido el material (más cercano al confinamiento y carga vertical simulados por este ensayo) en su aplicación como subbalasto.

Aparte de la realización de los ensayos anteriores, y para completar la caracterización de esta mezcla como subbalasto bituminoso, se desarrolló un ensayo destinado a evaluar de manera acelerada el posible daño de punzonamiento sufrido por el subbalasto en contacto con el balasto que soporta. Este es un factor clave que puede limitar la durabilidad de este tipo de solución. La

descripción del ensayo y de los parámetros que permiten evaluar este fenómeno se incluyen como parte del Anexo I de la presente tesis doctoral.



Figura 76. Placa de punzonamiento empleada en el ensayo de subbalasto bituminoso.

Finalmente, y para evaluar la fatiga del material y la posible fisuración ligada a la misma (uno de los factores principales que limitan el uso de subbalasto bituminoso), las distintas mezclas fueron también estudiadas mediante el ensayo UGR-FACT a tres cargas diferentes: 0.5, 0.75 y 1 kN correspondientes a una presión ejercida sobre el subbalasto del orden de 415, 625 y 830 kPa respectivamente.

4.2.4.3 Aplicación mezclas con polímeros reciclados para la mejora estructural y a largo plazo de pavimentos portuarios

En esta última aplicación de las mezclas modificadas con polímeros reciclados, se evalúa el empleo de mezclas para la mejora estructural de infraestructuras portuarias. Los pavimentos portuarios están sometidos a las condiciones de carga más desfavorables ya que no solo reciben elevadas cargas de circulación, sino también estáticas (debido al paso de vehículos pesados y almacenamiento de mercancías) y de impactos dinámicos (durante la manipulación de mercancías).

Además, dados sus condicionantes constructivos (con grandes extensiones de superficie, espacios abiertos sin proteger, proximidad al mar y con muchas horas de exposición solar), estos pavimentos tienen una gran exposición a los agentes climáticos que hace que su deterioro sea también mayor.

Tabla 23. Plan de trabajo desarrollado para el estudio del comportamiento mecánico a largo plazo de mezclas con polímeros reciclados aplicadas como subbalasto bituminoso.

Mezcla	Propiedad estudiada	Ensayos	
AC 22 S Betún base	Rigidez del material	- Ensayo rigidez (UNE EN 12697-26 Anexo C) a 5, 20 y 40 °C	
AC 22 S Betún altas prestaciones puertos	Evaluación resistencia a cargas estáticas	- Ensayo de Punzonamiento Estático UGR-PASPT a 2,6 y 5,2 Mpa	<u>Variación:</u> - Evolución deformación - Velocidad de deformación - Límite Resistencia a Punzonamiento Estático (LRPE) - Coeficiente de punzonamiento (η)
AC 22 S modificadas con polímeros reciclados	Resistencia a la fisuración por fatiga a distintos niveles de carga	- Ensayo de Impacto Dinámico UGR-PADPT	<u>Variación:</u> - Carga constante y Carga creciente - Profundidad de penetración - Vida punzonam. dinámico (N_f)

Para este análisis se fabricaron mezclas de tipo AC 22 S con los ligantes modificados que mejores prestaciones mostraron en las etapas anteriores. Estas se compararon con la fabricada con el betún modificado de referencia y con mezclas fabricadas con un betún de alto módulo y elevado contenido de polímeros (Tabla 6) cuyo empleo es común en este tipo de aplicaciones. A fin de limitar el efecto de otras posibles variables y en base a experiencias previas de diseño, se estableció un contenido fijo de betún del 4.75 % por peso de mezcla.

Para la comparativa entre las distintas tipologías, en primer lugar, se compararían las propiedades mecánicas de las mezclas mediante los ensayos Marshall y de módulo de rigidez (UNE EN 12697-26 Anexo C) a tres temperaturas: 5, 20 y 40°C. Tras ello, y para tener en cuenta las solicitaciones características a las cuales se ven sometidos este tipo de pavimentos, se incluyeron dos ensayos específicos desarrollados dentro del grupo de investigación LabIC.UGR para evaluar la durabilidad de capacidad estructural a largo plazo de este tipo de mezclas.

En primer lugar, el Ensayo de Punzonamiento Estático UGR-PASPT (University of Granada- Port Asphalt Static Punching Test) realizado a dos niveles de carga (50 y 100 kN) permite evaluar la resistencia de las mezclas a cargas estáticas como las producidas por el almacenaje de mercancías o el paso de vehículos pesados (Figura 77).



Figura 77. Ejemplo de la reproducción de las condiciones de carga que provocan el fenómeno de punzonamiento estático en pavimentos portuarios.

Por otra parte, el Ensayo de Impacto Dinámico UGR-PADPT (University of Granada – Port Asphalt Dynamic Punching Test) permite evaluar la resistencia frente a las cargas dinámicas procedentes de la manipulación de mercancías (descenso desde los vehículos o grúas hasta el pavimento) o la caída de piezas desde altura en determinadas zonas de puertos (Figura 78). Este ensayo se realizó tanto para una altura de carga constante, como para niveles crecientes de carga. Una descripción de los mismos y de los parámetros obtenidos mediante su empleo se incluyen en el Anexo I de la presente tesis doctoral.

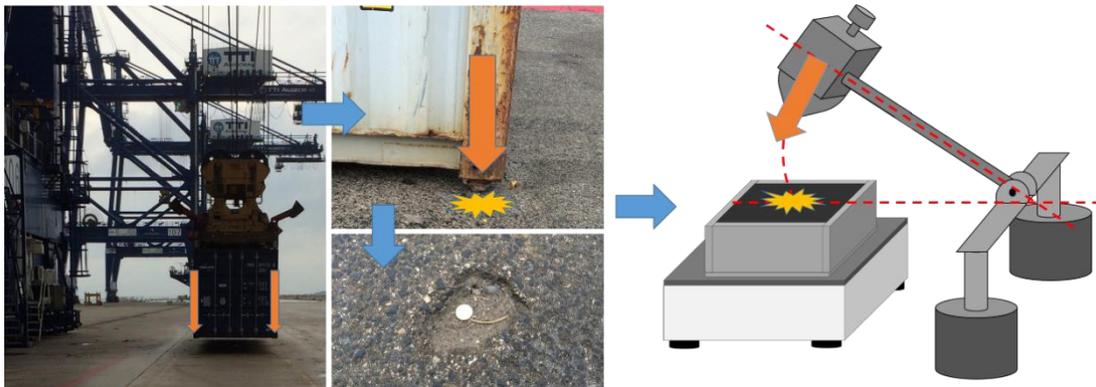


Figura 78. Ejemplo de la reproducción de las condiciones de carga que provocan el fenómeno de punzonamiento dinámico en pavimentos portuarios.

4.2.5. Análisis estructural, costes y consumo de polímeros reciclados

En este último apartado, se hace uso de los datos obtenidos durante la realización de la tesis doctoral para llevar a cabo un análisis dimensional de la aplicación de las mezclas modificadas con polímeros reciclados como medio para evaluar la potencial reducción de espesor que supondría su empleo en base a la caracterización mecánica previamente realizada. Con los datos obtenidos se realizó, además, una estimación del ahorro de costes y potencial consumo de polímeros que supone el empleo de este tipo de tecnología.

4.2.5.1 Análisis de dimensionamiento estructural

Se llevó a cabo un análisis tenso-deformacional que permitiese comprobar la capacidad estructural de las mezclas estudiadas. Como hipótesis de dimensionamiento, se estableció una solución genérica que permitiese la evaluación del material en las condiciones más desfavorables posibles. El modelo empleado estaba compuesto por:

- Un paquete de mezcla bituminosa tipo SMA 16 de 15 centímetros. Dicho paquete fue escogido con el fin de tener un margen suficiente para establecer potenciales ahorros al reducir espesores de capa.
- Una capa granular de tipo zahorra de 25 centímetros. Esta fue elegida para la modelización con el objetivo de minimizar la capacidad portante de las capas inferiores de la estructura. De esta manera, se simula hasta qué punto la mezcla era capaz de resistir una vez las tensiones de tracción se maximizaban al perder el resto de la infraestructura su capacidad estructural.
- Como suelo subrasante se empleó una explanada de tipo S1 (ORDEN FOM/3460/2003, 2003).

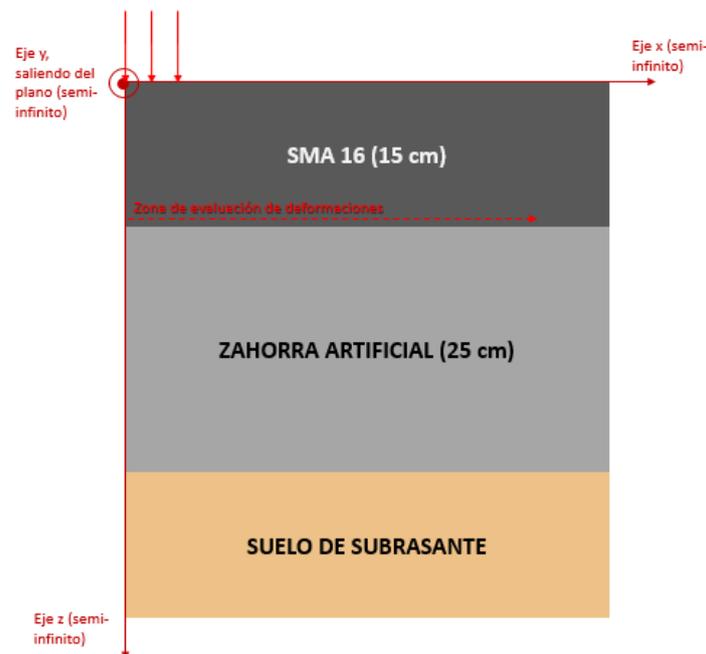


Figura 79. Estructura empleada para el dimensionamiento del firme.

A partir de dicha estructura se evaluaron tres modelos distintos variando el tipo de mezcla empleado. Se comparó así la mezcla fabricada con el betún base y las mezclas modificadas con

los dos polímeros reciclados que mejores resultados mostraron tras el análisis multiescala de la mezcla. Los parámetros empleados para la evaluación del modelo se muestran en la Tabla 24.

Tabla 24. Parámetros empleados en la modelización.

Capa	Módulo de elasticidad (E) (Mpa)	Coefficiente de Poisson
SMA 11	Obtenido de los resultados de módulo de rigidez a 20°C	0.33
Zahorra	150	0.35
Subrasante	60	0.40

En relación a la carga aplicada sobre la estructura modelizada, se consideró una carga de la misma magnitud que la empleada durante la evaluación del ensayo de punzonamiento estático en puertos, es decir, una fuerza de 100 kN correspondiente a una presión de 5.2 MPa. Dicha carga es mayor a la que supondría un eje como el empleado en el dimensionamiento de carreteras (64 kN y 800 MPa) y su elección se basa en la premisa de considerar el desempeño estructural de las mezclas modificadas con polímeros reciclados ante la situación más desfavorable posible de entre todas las evaluadas en la presente tesis doctoral.

Para evaluar las diferencias entre modelos, se analizaron las deformaciones horizontales de tracción producidas en el fondo de la capa de mezcla bituminosa las cuales darían lugar a la fisuración de la misma que, eventualmente y tras cumplir con su vida de fatiga, se manifestarían en la superficie. A la hora de considerar la magnitud de dichas deformaciones hay que considerar que los máximos valores de los esfuerzos no se producen justo en el punto que se encuentra bajo la vertical de la aplicación de la carga. Además, a medida que se produjesen las hipotéticas reducciones en el espesor de capa bituminosa debido al empleo de los polímeros reciclados, varía el estado tensional de la estructura y la distancia a la que se producen los máximos esfuerzos. Por este motivo, se evaluó una matriz de puntos para cada variación de modelo, de manera que siempre se garantizase la evaluación de la máxima deformación producida en cada caso (Figura 80).

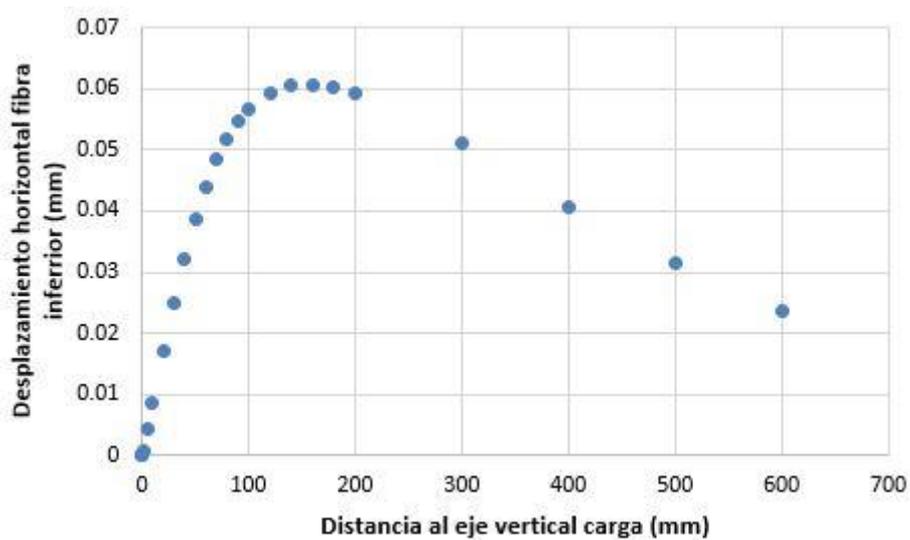


Figura 80. Evolución de la deformación en función de la distancia de aplicación al eje de carga.

El análisis del modelo estudiado se realizó empleando dos softwares basados en la modelización de Multicapa Elástica: OpenPave desarrollado en la Universidad de California, y 3D-Move Analysis desarrollado en la Universidad de Nevada, Reno.

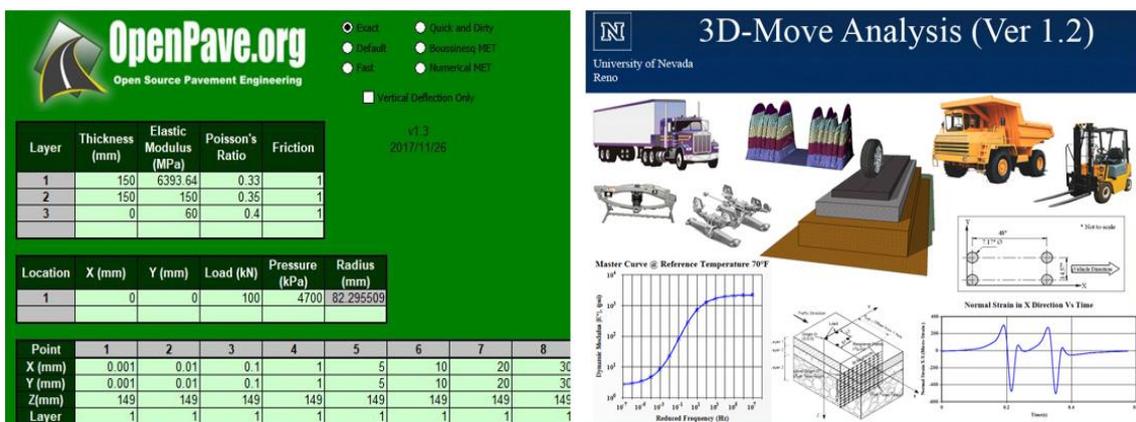


Figura 81. Software de modelización empleados en el análisis de dimensionamiento.

Habiendo establecido los niveles de deformación alcanzados, se hizo uso de las leyes de fatiga de las distintas mezclas para establecer el número de ciclos de fallo que resistiría cada una de las estructuras evaluadas. Dichas leyes se obtuvieron mediante un ajuste potencial sobre los datos de UGR-FACT de las mezclas previamente estudiadas, representando el número de ciclos hasta el fallo de cada muestra frente a la deformación horizontal inicial de la misma.

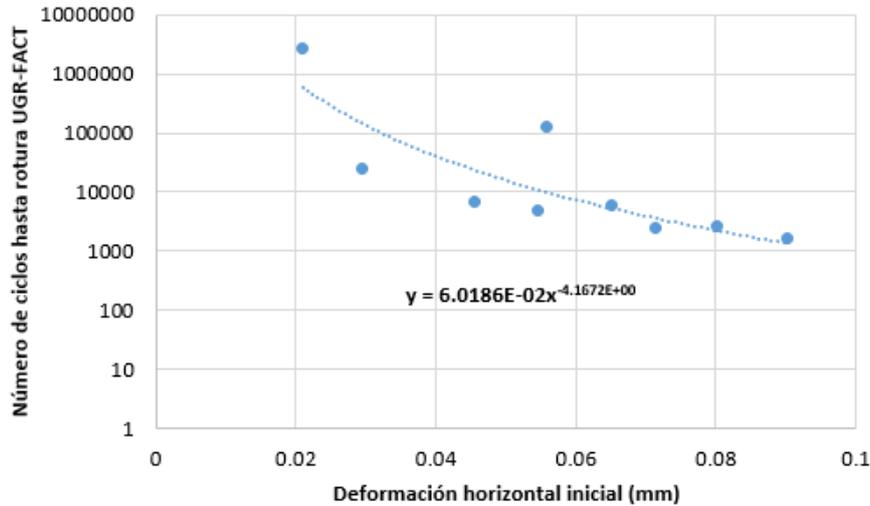


Figura 82. Ejemplo de obtención de leyes de fatiga para el dimensionamiento.

Tras fijar el número de ciclos hasta el fallo, se empleó como condición general de fallo la resistencia de la mezcla de peor desempeño y se calcularon, de nuevo a través de las leyes de fatiga, las deformaciones equivalentes necesarias para que cada una de las otras dos mezclas alcanzaran dicha resistencia. Para ello, se crearon nuevos modelos en los cuales se reducía de manera paulatina el espesor de la capa de firme hasta alcanzar la deformación objetivo (diferente en cada solución en función de su ley de fatiga). De este modo, fue posible evaluar el espesor del paquete de firme necesario para que las tres mezclas tuviesen la misma capacidad estructural.

4.2.5.2 Análisis de costes

Tras haber evaluado las propiedades mecánicas de las mezclas desarrolladas, se realizó un estudio económico comparativo entre las distintas tipologías de mezcla para evaluar el grado de reducción de costes alcanzado mediante el empleo de polímeros reciclados. Como referencia y, a modo de ejemplo, se escogió la aplicación de la mezcla SMA en carreteras por ser esta la aplicación con un mayor potencial de reciclaje de polímeros (al ser la red de transporte de mayor extensión). De este modo, se pudo tener una perspectiva global desde el punto técnico y económico que permitiera, junto con los beneficios ambientales, dar una idea la viabilidad de su uso.

Como medio para realizar la comparativa económica entre tipologías de mezclas, se hizo uso de una “Herramienta para el análisis económico y ambiental de los procesos de fabricación y puesta en obra de mezclas bituminosas” (Tauste, 2014) desarrollada por el autor de esta tesis como parte de su proyecto de fin de carrera en la titulación de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos cursada en la Universidad de Granada. Esta aplicación implementada en Excel permite

Estudio de viabilidad del empleo de polímeros reciclados para la mejora estructural de infraestructuras de transporte

la comparación entre diversas alternativas, así como el estudio de las nuevas tipologías de mezcla y tecnologías de fabricación y puesta en obra. El software permite introducir los datos de producción (rendimiento, consumos energéticos, temperaturas, etc.) y los costes vinculados a las materias primas utilizadas (considerando su modo de dosificación), así como los distintos procesos de transporte, fabricación y puesta en obra (maquinaria, producciones horarias, costes de mano de obra, etc.) (Figura 83).

Materias primas

Recursos naturales

Áridos

Fracción Árido:

Naturaleza Árido:

Porcentaje empleado:

Procedencia del árido:

Distancia de procedencia (Km):

Coste (€/Tn):

Añadir fracción

Filler recuperación

Porcentaje empleado:

Recursos Industriales

Ligantes

Denominación:

Tipología:

Coste (€/Tn):

Porcentaje empleado:

Añadir ligante

Figura 83. Ejemplo de entrada de datos en el software.

Del mismo modo, dicha aplicación facilita gráficos comparativos de costes entre mezclas tanto en términos de partidas de precios (materias primas, fabricación, puesta en obra, etc.), como en términos de distribución de los costes dentro de cada una de ellas (Figura 84).

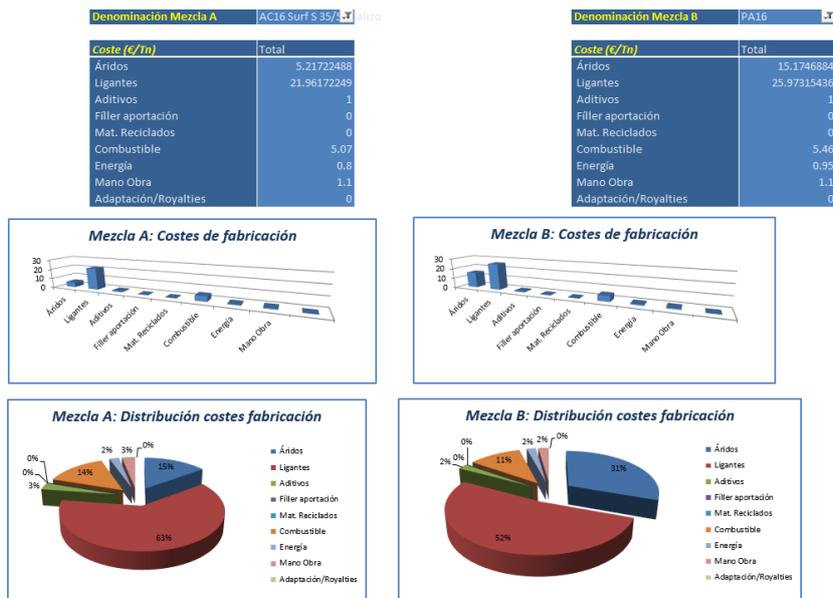


Figura 84. Ejemplo de análisis de coste comparativo suministrado por el software.

Como valores de entrada para los distintos materiales empleados en el estudio, se hizo uso de los datos facilitados por distintos distribuidores y empresas del sector, los presentes en la base de precios del ministerio de Fomento y los obtenidos de distintos artículos como la revisión de polímeros reciclados de (Brasileiro et al. 2019) o de la comparativa entre mezclas de (Moreno-Navarro et al., 2017). En el estudio comparativo, se consideró que los costes vinculados a transporte de materias primas estaban incluidos en el precio de las mismas mientras que el coste de transporte a planta fue omitido por considerar la misma planta y distancia a obra para todas las tipologías.

Finalmente, tras haber analizado la diferencia entre los costes de fabricación y puesta en obra de las distintas tipologías de mezcla, se emplearon los datos aportados por el análisis de dimensionamiento previamente descrito como medida del grado en el que la potencial reducción de espesores puede contribuir a alcanzar un mismo grado de desempeño estructural reduciendo el coste de la inversión inicial realizada.

4.2.5.3 Análisis de consumo de polímeros reciclados

En este último apartado, y como forma de evaluar el potencial de reciclaje de las soluciones desarrolladas, se realizó un cálculo de la cantidad de polímero potencialmente consumida de acuerdo al diseño de la mezcla desarrollado en el transcurso de la tesis. Para ello, se analizó la aplicación de la misma a una sección habitual de carretera convencional (para velocidad máxima entre 70 y 100 km/h) compuesta por una capa de 3 centímetros de mezcla SMA aplicada sobre dos carriles de 3.5 metros de anchura y dos arcenes de 1.5 metros (ORDEN FOM/273/2016, 2016).

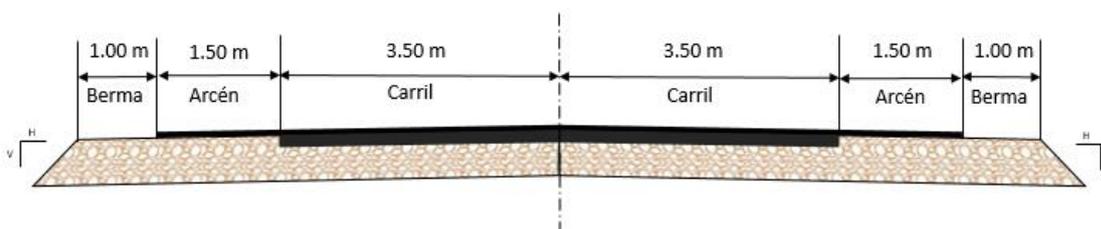


Figura 85. Sección de carretera convencional empleada en la evaluación del consumo potencial de polímeros reciclados.

Análisis de Resultados

Analysis of Results

5. Análisis de Resultados

Este quinto capítulo recoge los resultados obtenidos durante la realización de la presente tesis doctoral. El análisis de dichos resultados está estructurado de acuerdo a las distintas etapas descritas en el capítulo de metodología.

5.1. Evaluación de la interacción entre ligante y polímeros reciclados

Bajo el objetivo de profundizar en el estudio de la interacción entre ligante y polímero, en esta primera etapa de trabajo se evaluó la influencia del contenido de polímero incorporado y de la tipología de polímero empleada. De este modo, es posible establecer cómo estas variables condicionan el proceso de modificación y las propiedades mecánicas del ligante modificado final.

5.1.1 Influencia del contenido de polímero incorporado

Tras haber establecido el tamaño de incorporación del polímero reciclado y las condiciones de mezclado del mismo en base a la revisión del estado del arte, se muestran los resultados relativos a la influencia del contenido de polímero incorporado en la modificación. Para ello se estudió la adición del polímero LDPE de referencia para contenidos del 3%, 5% y 7% sobre el peso de ligante para una cantidad de 700 gramos de betún (la empleada habitualmente en cada modificación) (Figura 86).



Figura 86. Porcentajes estudiados para el polímero reciclado tipo LDPE.

A medida que el contenido de ligante incorporado era mayor, fue posible observar que los tiempos necesarios para lograr el mismo grado de integración entre el polímero reciclado y el betún variaban. Tal y como era de esperar, y teniendo en cuenta que la temperatura se mantuvo constante en 165°C, a medida que el contenido de polímero incorporado es mayor también se incrementa el tiempo necesario para la modificación, oscilando este entre los 40 minutos para el menor contenido y alrededor de los 75 para el mayor.

5.1.1.1 Propiedades básicas de los ligantes modificados

Penetración y temperatura de reblandecimiento

Como se puede observar en la Tabla 25, a medida que el porcentaje de polímero incorporado se incrementa, mayor es la reducción producida en la penetración y mayor la temperatura de reblandecimiento lo que indica un comportamiento más rígido del ligante modificado. Desde el punto de vista mecánico, un aumento en la temperatura de reblandecimiento indica una menor susceptibilidad a las deformaciones plásticas mientras que valores pequeños de penetración apuntan hacia una mayor resistencia a altas temperaturas.

Tabla 25. Modificación de penetración y temperatura de reblandecimiento tras la adición de distintos porcentajes de LDPE.

Ligante	Penetración (dmm)	Temperatura de reblandecimiento (°C)
B 50/70	52	50
B 50/70 + 3 % LDPE	34	57
B 50/70 + 5 % LDPE	31	58
B 50/70 + 7 % LDPE	23	83

Viscosidad dinámica

Del mismo modo, cuando comprobamos la evolución de la viscosidad a distintas temperaturas (Figura 87) podemos observar que, a medida que el contenido de polímero añadido es mayor, también lo es la viscosidad del ligante modificado, aunque sin superar en ningún caso el límite de 3 Pa·s a 135 °C señalado por el SHRP.

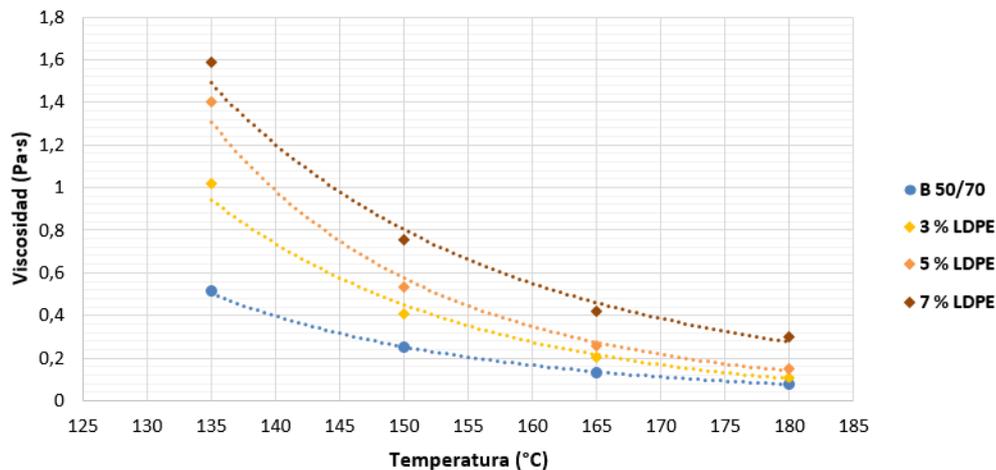


Figura 87. Evolución de la viscosidad dinámica con la temperatura para distintos porcentajes de LDPE.

5.1.1.2 Caracterización reológica de los ligantes modificados

Previo al estudio de la estabilidad al almacenamiento de los distintos ligantes modificados, se presentan los resultados de caracterización reológica de estos. De este modo, en la Figura 88 se muestra la representación de los diagramas de Black de los distintos porcentajes de LDPE. En ella se observa que, a medida que el contenido de polímero reciclado crece, se aprecia un movimiento hacia la derecha y hacia debajo de la curva indicando una mayor rigidez y comportamiento más elástico del ligante al aumentar el módulo complejo (G^*) y reducirse el ángulo de fase. Esto apunta hacia una menor susceptibilidad a las deformaciones permanentes a altas temperaturas de las mezclas que incorporan estos ligantes si se comparan con las del betún base B50/70.

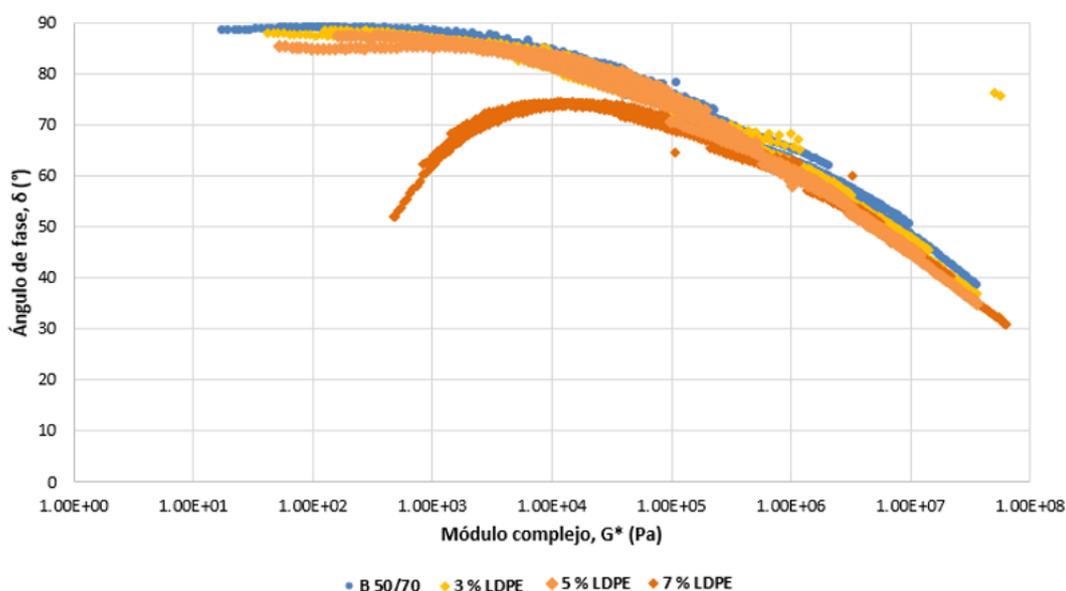


Figura 88. Diagramas de Black de los distintos porcentajes de LDPE reciclado.

Aunque para las distintas temperaturas las curvas obtenidas se superponen entre sí mostrando un comportamiento termorreológico simple del ligante (sus propiedades reológicas siguen una evolución equivalente con la temperatura), para el porcentaje mayor (7%) se produce una caída pronunciada en el ángulo de fase para los valores correspondientes a las mayores temperaturas de trabajo. Por ello, y considerando que el comportamiento es reológicamente simple (la pérdida de simplicidad reológica es más común en los betunes modificados con elastómeros o plastómeros de mayor densidad) este comportamiento puede indicar, un grado peor de interacción entre el betún y el polietileno y, fruto de esto, la posibilidad de que se presenten problemas de separación de fases durante el almacenamiento.

Por otro lado, en la Figura 89 se muestran las isocronas a 5 Hz de los distintos porcentajes de polímero reciclado (LDPE) así como el betún base (B 50/70). Observando estas, se puede

apreciar cómo el aumento de rigidez y del comportamiento elástico del ligante previamente observado es más marcado a medida que el porcentaje de plastómero incorporado es mayor y la temperatura de ensayo más alta. No obstante, incluso para el menor contenido de plastómero (3%) es posible establecer diferencias de comportamiento en relación al ligante base (B50/70). En vista de estos resultados, el contenido de LDPE que provoca un mayor cambio en las propiedades del ligante es el porcentaje del 7%.

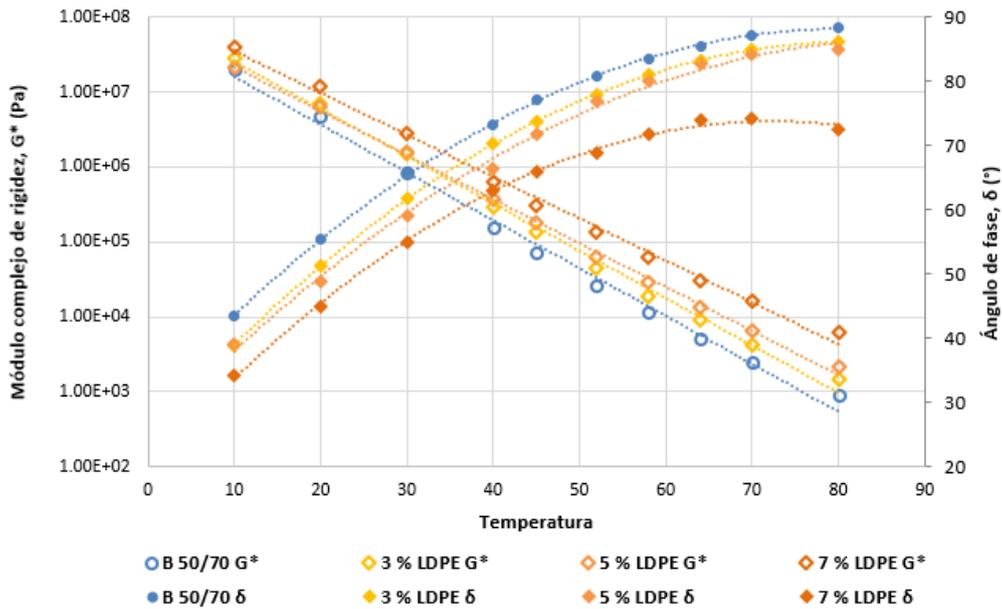


Figura 89. Isocronas a 5 Hz de los distintos porcentajes de LDPE reciclado.

5.1.1.3 Estabilidad al almacenamiento

Tras comprobar que incluso en el porcentaje de adición más bajo el polímero reciclado LDPE es capaz de modificar las propiedades reológicas del betún, a continuación, se muestran los resultados relativos al estudio de la estabilidad al almacenamiento. En la Tabla 26 se pueden observar los resultados en términos de la variación de los valores de penetración y temperatura de reblandecimiento entre las partes superiores e inferiores de las muestras sometidas al acondicionamiento.

Tabla 26. Resultados de estabilidad al almacenamiento de los distintos porcentajes de LDPE reciclado.

Ligante	Penetración parte superior (dmm)	Penetración parte inferior (dmm)	Δ Penetración (dmm)	Temperatura reblandecimiento superior (°C)	Temperatura reblandecimiento inferior (°C)	Δ Temperatura reblandecimiento (°C)
B 50/70 + 3 % LDPE	34	31	3	56	56	0
B 50/70 + 5 % LDPE	35.3	35.5	0.2	58	58	0
B 50/70 + 7 % LDPE	21.0	23.0	2	87	60	27

Se puede comprobar como la variación en los valores de penetración no son demasiado significativos incluso en el caso del mayor porcentaje de polímero, el 7%. Sin embargo, cuando analizamos la temperatura de reblandecimiento sí se observa una importante variación entre la parte superior e inferior del tubo para este porcentaje, muy superior a la diferencia máxima de 4 propuesta por distintos autores (Kalantar et al. 2012; Vargas et al. 2013). De este modo se comprueba que cuando se trata de evaluar distintos contenidos, la temperatura de reblandecimiento es un parámetro más sensible.

A simple vista la separación de fases también quedaba de manifiesto observando grandes aglomeraciones de polímero en las muestras del ensayo de anillo y bola (Figura 90) lo que confirma la falta de estabilidad y los resultados obtenidos en la caracterización reológica.



Figura 90. Aglomeraciones de LDPE encontradas en el ensayo de anillo y bola de la parte superior del mayor contenido de polímero estudiado.

Por todo ello, este porcentaje de polímero no es aplicable directamente a no ser que se hiciera uso de algún agente estabilizador, lo cual limitaría la aplicabilidad del ligante al encarecer su coste. Los porcentajes del 3% y 5%, sin embargo, muestran un comportamiento casi idéntico entre las partes superiores e inferiores del tubo de ensayo lo que confirma la estabilidad al almacenamiento de estos ligantes.

De esta forma, y tras descartar el empleo del 7% de LDPE reciclado por sus problemas de estabilidad al almacenamiento, el porcentaje seleccionado como óptimo para este tipo de polímero y como referencia en las demás modificaciones fue el 5% por peso de ligante. Para este contenido se consiguen maximizar los cambios producidos en el betún sin que ello suponga un perjuicio a la estabilidad del sistema obtenido.

5.1.2. Influencia del tipo de polímero

Una vez fijado el contenido óptimo de polímero para el plastómero de referencia (LDPE), en esta sección se muestran los resultados relativos a la comparación entre tipologías de polímero (LDPE, LLDPE procedente de geomembrana y LDPE + PNFVU). Se evaluó así el efecto de la combinación de un tipo de polietileno similar al anterior pero que incorpora además fibras (LLDPE geomembrana), y los beneficios de la combinación de elastómeros y plastómeros (LDPE + PNFVU).

En relación al tiempo necesario para la modificación, fue necesario incrementar la duración de este (pasando de 60 a 90 minutos). En el caso del LLDPE de geomembrana, la necesidad de mayores tiempos que en el caso del LDPE procedente de consumo doméstico está relacionado con la mayor complejidad estructural del residuo de geomembrana, el cual combina una capa de LLDPE (más sencillo de modificar por separado y que proporciona mayor estabilidad (Liang et al, 2019)) y una capa de fibras de poliéster que también quedan, en este caso, imbuidas en el ligante incrementando la duración del proceso.

En cuanto a la combinación de LDPE + PNFVU, se da lugar a algo similar, ya que la presencia de un elevado contenido de caucho (10%) hace necesarios mayores tiempos de digestión. Esto está en consonancia con otros estudios anteriores (Bermejo-Muñoz et al., 2014) en los que se han referido tiempos de mezclado superiores a una hora.

5.1.2.1 Evaluación de la influencia del tipo de polímero en la interacción con el betún tras el proceso de modificación

Estabilidad al almacenamiento

Previo a establecer las características de los betunes modificados con polímeros reciclados, se muestran los resultados de estabilidad al almacenamiento de los mismos con el fin de garantizar su aplicabilidad. Así, en la Tabla 27 se encuentran recogidas las variaciones en los valores de penetración y temperatura de reblandecimiento entre las partes superior e inferior de los tubos del ensayo de estabilidad al almacenamiento.

Tabla 27. Resultados de estabilidad al almacenamiento de los distintos polímeros reciclados estudiados

Ligante	Penetración parte superior (dmm)	Penetración parte inferior (dmm)	Δ Penetración (dmm)	Temperatura rebland. superior (°C)	Temperatura rebland. inferior (°C)	Δ Temperatura rebland. (°C)
B 50/70 + 5 % LDPE	35.3	35.5	0.2	58	58	0
B 50/70 + 5 % LLDPE GEO	27	21	6	58	57	1
B 50/70 + 5% LLDPE + 10 % PNFVU	30	28	2	69	67	2

Se puede observar cómo para estos ligantes las diferencias de penetración y de punto de reblandecimiento crecen si comparamos con los betunes modificados con LDPE procedente del reciclado doméstico. No obstante, tanto en el caso del LLDPE de geomembrana como la combinación de LDPE + PNFVU, las variaciones de ambos parámetros se mantienen en un orden similar a las de un betún modificado en refinería como el PMB 45/80-65 y dentro de las recomendaciones de otros autores: diferencias menores a 9 dmm y menos de 4-5 °C (Kalantar et al. 2012; Vargas et al. 2013) lo que indica que los betunes desarrollados son estables.

A tenor de estos resultados, se confirmó el contenido óptimo del 5 % de polietileno para ambas fuentes de reciclaje de este material (doméstico y de geomembrana) y la posibilidad de combinar el mismo con un 10% de PNFVU sin comprometer la estabilidad del betún resultante.

Propiedades básicas de los ligantes modificados

Demostrada la posibilidad de emplear los distintos tipos de polímeros, se muestran en este apartado los resultados relativos a las propiedades básicas de estos y su comparativa con el ligante base (B 50/70) y el ligante modificado en refinería (PMB 45/80-65).

Penetración y temperatura de reblandecimiento

Comenzando por la penetración y punto de reblandecimiento de las distintas soluciones, en la Tabla 28 se muestran los resultados correspondientes a los distintos polímeros reciclados así como una primera aproximación a la caracterización de su susceptibilidad térmica a través del índice de penetración.

En ella se aprecia un aumento de la rigidez asociado a la incorporación de polímero, con menores valores de penetración y mayores valores de punto de reblandecimiento que el betún base. En este sentido, a medida que el polímero es más complejo (a través de la adición de fibras) o se combinan dos tipos (LDPE+PNFVU), el betún resultante se aproxima en mayor grado al betún

modificado en refinera. Sin embargo, en relación a la penetración, la reducción para el LDPE GEO y la combinación de LDPE+PNFVU es similar pese al mayor contenido de polímero de este último. Esto confirma uno de los efectos referidos en la revisión del estado del arte acerca de la combinación de plastómeros y elastómeros, situándose el betún resultante en un punto intermedio entre ambos materiales.

Tabla 28. Comparativa de penetración y temperatura de reblandecimiento entre los contenidos óptimos de polímeros reciclados y los betunes de referencia.

Ligante	Penetración (dmm)	Temperatura de reblandecimiento (°C)	Índice de penetración (PI)
B50/70	52	50	-1.12
PMB 45/80-65	56	65	2.28
B50/70 5% LDPE	31	58	-0.45
B50/70 5% GEO LLDPE	23	62	-0.27
B50/70 5% LLDPE + 10% PNFVU	26	78	2.48

En cuanto al índice de penetración (PI), valores altos de este parámetro como los encontrados para el betún modificado de referencia (PMB 45/80-65) son indicativos de una menor susceptibilidad a la temperatura. Por otro lado, valores bajos como los del betún base (B 50/70) indican una mayor tasa de variación de comportamiento cuando la temperatura varía.

En este sentido, se puede observar cómo la adición del polietileno reciclado (LDPE o LLDPE geomembrana) reduce la susceptibilidad térmica del ligante, pudiendo llegar esta a ser incluso menor que la del betún modificado de referencia para el caso de la combinación del polietileno con el caucho (LDPE + PNFVU). Esto podría ser indicativo de una buena resistencia a las deformaciones permanentes a altas temperaturas sin un aumento del riesgo de fisuración a las temperaturas más bajas.

Viscosidad dinámica

Entrando en el análisis de la viscosidad dinámica de las distintas soluciones, en la Figura 91 se encuentran representados los valores de viscosidad de los betunes modificados con los distintos polímeros reciclados y los betunes de referencia.

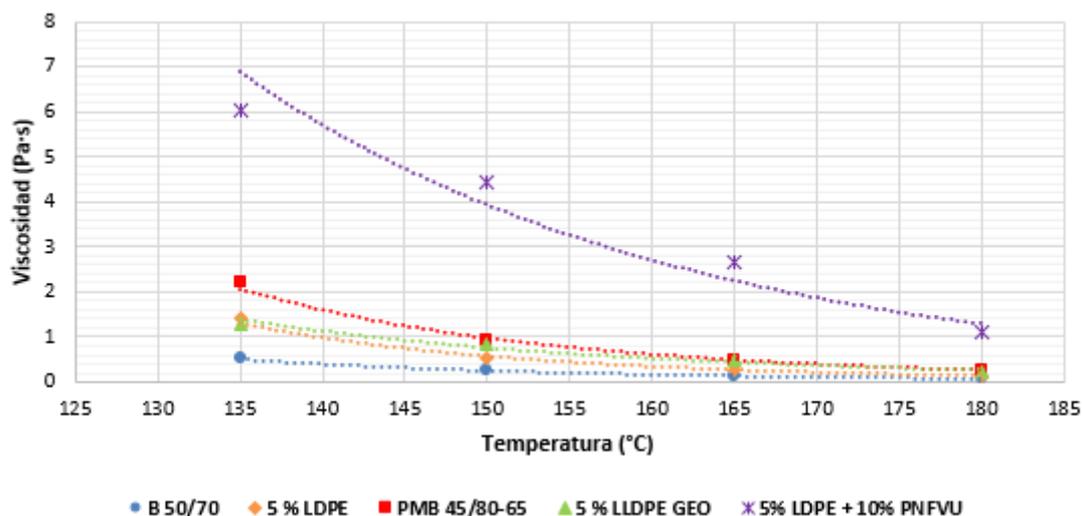


Figura 91. Valores comparativos de viscosidad dinámica a distintas temperaturas.

Tal y como se puede apreciar, la viscosidad de los polímeros modificados se incrementa con respecto a la del betún base en todo el rango de temperaturas. No obstante, en el caso del residuo de geomembrana (LDPE GEO) y para la temperatura de trabajo del betún (165°C), se obtienen unos valores de viscosidad similares al betún modificado en refinería (PMB 45/80-65). De este modo y, al igual que ocurre con el betún modificado con LDPE de consumo doméstico, para las temperaturas más bajas la viscosidad es incluso menor a la de este y, por tanto, menor al límite de 3.0 Pa·s a 135 °C recomendado por el SHRP (Strategic Highway Research Program).

En relación al betún que combina plastómeros y elastómeros (LDPE + PNFVU), los resultados obtenidos son más altos que en los otros casos. Esto puede estar relacionado con la propia naturaleza del ligante debido a la presencia de partículas de caucho que no llegan a ser digeridas completamente dentro de la matriz del betún. No obstante, se puede observar cómo a medida que nos aproximamos a la temperatura de trabajo del ligante, la diferencia entre los valores de viscosidad obtenidos y el del ligante modificado de referencia se reduce.

En base al incremento de la viscosidad obtenido al incorporar los polímeros reciclados, este permitiría el aumento, si se desea, del contenido de ligante sin dar lugar a problemas de escurrimiento y mejorando la adhesividad con los áridos y el comportamiento frente al envejecimiento (al crear una capa más espesa alrededor de los áridos que limite la permeabilidad del oxígeno) (Tauste et al. 2018b). Todo ello, sin poner en riesgo el bombeo del ligante o la trabajabilidad de la mezcla durante su compactación, ya que, incluso el betún modificado con polietileno y caucho, este se mantiene en el rango de 5-30 Pa·s recomendado por otros autores (Hunter et al. 2015) para garantizar la trabajabilidad de la mezcla durante el momento en el que la temperatura del betún es más baja (150-155°C).

Caracterización reológica de los ligantes modificados

En este apartado se muestran los resultados relativos a la caracterización reológica de los distintos ligantes modificados como medio de extender la caracterización previa a un mayor rango de temperaturas y frecuencias.

Así, partiendo de los barridos de frecuencia realizado sobre los distintos betunes se obtienen en primer lugar, los diagramas de Black de estos ligantes (Figura 92) que permiten analizar el comportamiento termorreológico de los mismos. El desplazamiento de las curvas tras la adición de los polímeros de tipo polietileno confirma el comportamiento más rígido y elástico de estos betunes si comparamos con el betún base (algo mayor en el caso del residuo de geomembrana). En cuanto a la combinación de LDPE + PNFVU, este presenta un comportamiento termorreológicamente algo más complejo, aunque sin llegar a la complejidad del betún PMB 45/80-65.

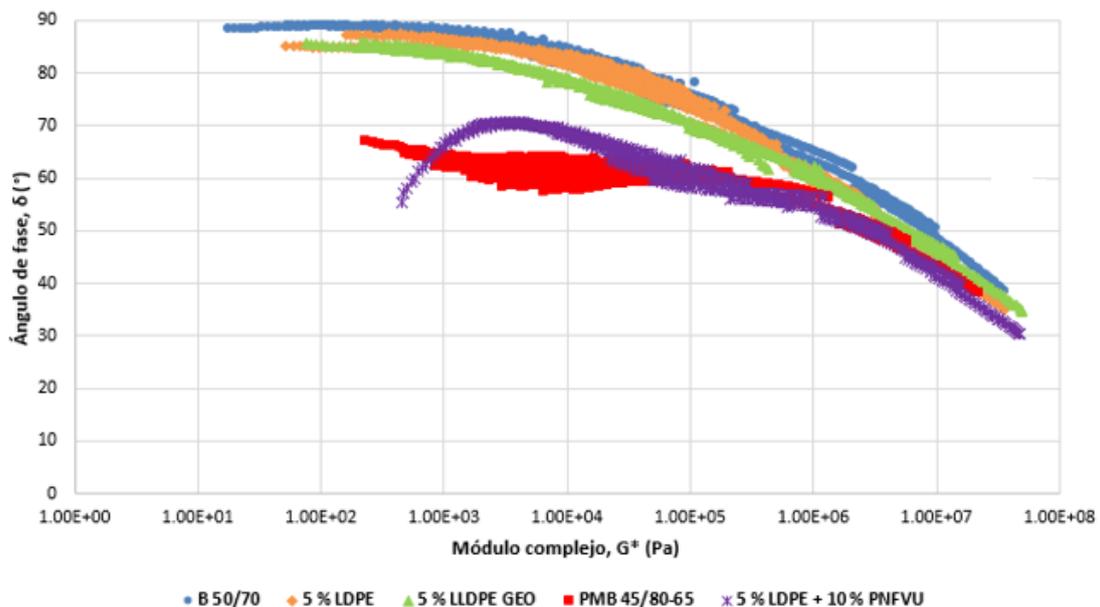


Figura 92. Diagramas de Black de los distintos ligantes modificados con polímeros reciclados y betunes de referencia.

Para las temperaturas más altas de esta combinación de polímeros, se produce un marcado descenso en los valores de ángulo de fase. Este comportamiento es típico de modificaciones en las que interviene el caucho con o sin la presencia de otros polímeros de tipo plastómero (Celauro et al., 2012; Brasileiro et al. 2019). Tal y como se refería en el caso de la influencia del contenido del polímero, en estos casos es necesario garantizar que no se ha producido

separación de fases entre el polímero y el ligante mediante el estudio de su estabilidad (Ahmedzade et al., 2014).

A diferencia del empleo del mayor contenido de LDPE, en este caso la reología indica un comportamiento termorreológicamente complejo (más similar a un betún modificado en refinería) y, pese a contar con un contenido de polímero total más elevado (15%), la estabilidad alcanzada es mucho mayor, manteniéndose la caída del ángulo de fase en un rango similar a la del betún modificado de referencia. Por ello, el comportamiento observado es indicativo de la formación de una matriz polimérica dentro del betún para la cual las propiedades elásticas del polímero tienen prevalencia sobre el comportamiento viscoso del betún a altas temperaturas, pero en el que la interacción entre polímero y betún es lo suficientemente adecuada.

La representación de las isocronas a 5 Hz (frecuencia que se corresponde con la de una vía de alto nivel de tráfico) permiten, por otra parte, precisar las diferencias observadas. En la Figura 93 se puede apreciar la evolución del módulo complejo de rigidez (G^*) y ángulo de fase (δ).

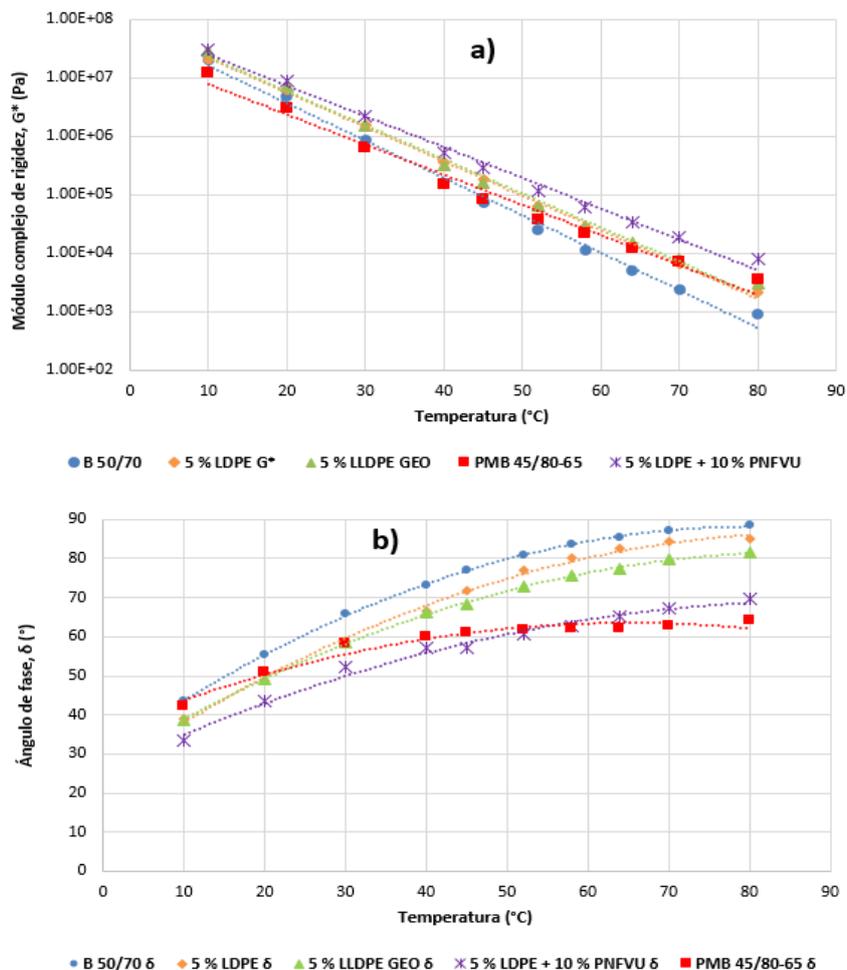


Figura 93. Isocronas a 5Hz de los distintos betunes a distintas temperaturas. a) Evolución del módulo de rigidez complejo (G^*). b) Evolución del ángulo de fase (δ).

Atendiendo al módulo de rigidez, ambos tipos de polietileno muestran un comportamiento similar para todo el rango de temperaturas, próximo al del betún modificado de referencia (PMB 45/80-65) a las más altas. No obstante, sí se produce mayor variación en relación con el ángulo de fase a dichas temperaturas (donde en términos generales las diferencias son mayores). El polietileno procedente de geomembrana (LLDPE GEO) presenta un comportamiento más elástico que el modificado con polietileno procedente del consumo doméstico (LDPE), presumiblemente como consecuencia de la presencia de fibras en su composición, aunque sin llegar a los niveles del betún modificado de referencia.

En relación a la combinación del polietileno y el polvo de neumático, esta alcanza la mayor rigidez como ya se podía intuir de los resultados de penetración y punto de reblandecimiento, indicando una posible mayor resistencia a las deformaciones a altas temperaturas como la referida en otros estudios (Ge et al. 2016; Farahani et al. 2018). El descenso del ángulo de fase está en consonancia con lo referido en la revisión del estado del arte, ya que los polímeros de tipo plastómero no son capaces de aportar un comportamiento tan elástico como los de tipo elastómero (como los SBS que forman parte del betún modificado de referencia) o el caucho presente en el PNFVU. Por este motivo, es la combinación de LDPE + PNFVU la que más se acerca al comportamiento del modificado de referencia a altas temperaturas, manteniendo un comportamiento más similar a los otros tipos de polietileno a las temperaturas bajas donde predomina la acción de este material sobre la del caucho.

Analizando la susceptibilidad térmica de los distintos ligantes, en la Tabla 29 se pueden observar los valores de pendiente entre las temperaturas de 25 y 60 °C obtenidos para el módulo complejo los distintos ligantes a una frecuencia de 10 rad/s.

Tabla 29. Parámetro de susceptibilidad térmica de los distintos betunes.

Ligante	$S_{25-60} \times 10^{-2}$
B50/70	6.39
PMB 45/80-65	5.14
B50/70 5% LDPE	5.87
B50/70 5% GEO LLDPE	5.82
B50/70 5% LLDPE + 10% PNFVU	5.26

Se puede observar cómo, siguiendo la tendencia observada en la del Índice de penetración (PI), la pendiente se reduce al añadir polímeros al betún base indicando una menor susceptibilidad a los cambios de temperatura.

En este sentido, la adición de los dos tipos de polietileno (LDPE y LLDPE geomembrana) dan lugar a una reducción de la susceptibilidad similar, situándose a medio camino entre el ligante base (B 50/70) y el betún modificado de referencia (PMB 45/80-65). Esto está en sintonía con lo encontrado en otros estudios que analizan el empleo de polietileno (Punith & Veeraragavan, 2010; Bala, Kamaruddin, & Napiah, 2017; Singh, Tophel, & Swamy, 2017). Por otra parte, la adición de un polímero de tipo elastómero (como el caucho presente en el PNFVU) al polietileno contribuye a lograr una susceptibilidad similar al del betún comercial, siendo indicativo de un comportamiento homogéneo en todo el rango de temperaturas de servicio, con una adecuada resistencia a la deformación a altas temperaturas y un buen comportamiento a las más bajas.

Análisis de la microestructura de los betunes modificados

Junto con la determinación de las propiedades básicas de los distintos ligantes y la evaluación de su estabilidad al almacenamiento y su comportamiento reológico se incluye, a continuación, un análisis de la microestructura de los ligantes realizado con el microscopio de fuerza atómica (AFM). Este permite estudiar con mayor profundidad la interacción entre las fases de betún y los distintos polímeros y cómo esta influye en el comportamiento previamente descrito.

Análisis topográfico

De este modo, en la Figura 94 se pueden observar, en primer lugar, las estructuras encontradas durante el estudio de los distintos ligantes a través del análisis de su topografía, mostrando la altura relativa de las mismas.

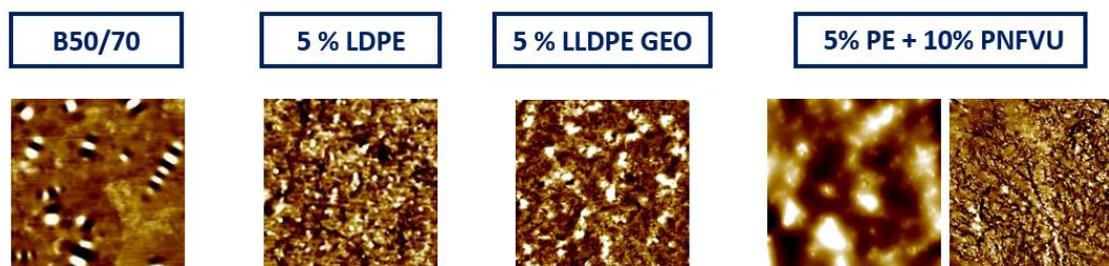


Figura 94. Imágenes topográficas de AFM de la microestructura de los distintos betunes.

De esta forma, si se observa el betún de penetración base (B 50/70), en el mismo se pueden apreciar las estructuras típicas presentes cuando se analizan betunes convencionales (Aguar-Moya et al., 2015). Las más características y comunes son las denominadas estructuras de abeja (bee-phase o cathana-phase en inglés). En relación a su origen existen distintas teorías (Tauste

el al., 2018b), desde las iniciales que las asociaban a los asfaltenos, pasando a aquellas que abogan por que estas son inducidas por la presencia de ceras parafínicas cristalizadas (Pauli et al. 2011), u otras más recientes que fijan su origen en la relación de los aromáticos con el resto de fracciones SARA del betún (Aguar-Moya 2015). Alrededor de estas estructuras y en color oscuro, se encuentra la peri-phase mientras que, el resto de la superficie (en color amarillento) la forma una fase continua o de matriz denominada para-phase. Finalmente, y dentro de la peri-phase, los elementos granulares más claros y de menor tamaño son denominados sal-phase.

Tras la adición de polietileno, las estructuras de abeja son mucho más escasas, de menor tamaño y mucho menos definidas (se produce una cierta integración entre la peri-phase y la catana-phase). Dentro de la matriz aparece, además, una cierta estructura reticular debido a la presencia del polietileno, de manera que la para-phase es mucho menos extensa y se encuentra más disgregada. Este fenómeno se repite para el polietileno modificado con geomembrana donde los contrastes son aún más pronunciados. La presencia de esta microestructura, es responsable del aumento de rigidez de estos betunes y, en consecuencia, de su mayor resistencia a las deformaciones permanentes (Bala et al. 2016).

Finalmente, y dentro de la modificación con la combinación de polietileno y caucho reciclados, podemos encontrar dos tipos de superficie dentro del betún. A una escala mayor y a través de la cámara incorporada dentro de la sonda del dispositivo (Figura 95), se pueden observar partículas de caucho no disueltas completamente dentro de la superficie del betún, y zonas más planas donde la interacción entre el caucho y el betún ha alcanzado una mayor integración.

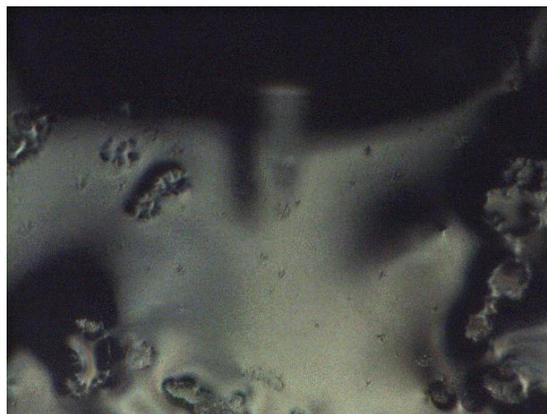


Figura 95. Superficie del betún modificado con la combinación de PNFVU y LDPE.

De esta forma, en la Figura 94 se observan, por un lado, imágenes con un mayor contraste de color (fruto de una mayor diferencia de altura) signo de la presencia de las partículas de caucho y, por otro, la superficie del betún donde las partículas de caucho son menores y se puede ver

el efecto de este componente dentro del resto de la matriz del betón. En este sentido, se observa una estructura aún más compleja que en caso de la modificación con polietileno, donde es imposible distinguir estructuras de abeja y la estructura reticular del polietileno es más marcada, apareciendo resaltos homogéneamente distribuidos y ligados a la interacción del caucho (Huang & Pauli 2008, (Kim, Mazumder, Torres, Lee, & Lee, 2017), polietileno y betón.

Cabe señalar que, independientemente del polímero reciclado empleado, las estructuras observadas siguen un patrón regular dentro de la superficie del ligante, lo que es indicativo de una buena distribución de los polímeros y, por tanto, un comportamiento homogéneo de los betunes. Para apreciar de manera más clara las diferencias de altura entre las superficies de los betunes previamente descritas, en la Figura 96 se muestran de nuevo las imágenes topográficas pero en tres dimensiones, de manera que se puedan observar las diferencias entre las distintas estructuras.

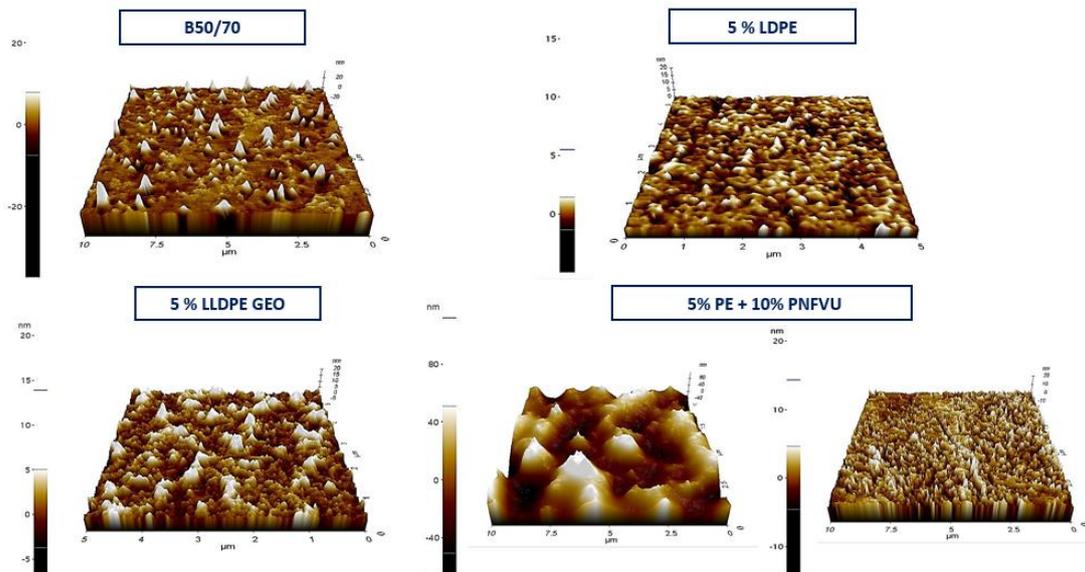


Figura 96. Imágenes topográficas tridimensionales de la microestructura de los distintos betunes.

De este modo, mientras que las típicas estructuras de abeja del ligante base alcanzan una altura media de unos 10 nanómetros, tras la modificación por el polietileno se puede ver como la superficie se vuelve mucho más regular con la disminución de tamaño y reducción del número de estas estructuras. No obstante, en las zonas más planas se muestra una rugosidad superior a la del betón base fruto de la estructura reticular creada por el polímero.

El polietileno procedente de geomembrana (LLDPE GEO), por su parte, incrementa la rugosidad previamente descrita ya que la presencia de fibras integradas en este material eleva la complejidad del mismo haciendo los contrastes más marcados. Por otra parte, para el betón modificado con la combinación de LDPE + PNFVU, se puede apreciar, en primer lugar y de

manera más clara la presencia del caucho tanto en la zona con partículas de mayor tamaño (entre 40 y 80 nanómetros), como en las zonas de mayor integración entre los tres materiales.

Para esta última se puede observar la distribución homogénea de las partículas de ambos polímeros dentro de la superficie del betón. De esta forma, mientras que las zonas de mayor integración son responsables de la mayor rigidez y menor susceptibilidad térmica observada dentro de los ensayos reológicos, la presencia de partículas de mayor tamaño (cuya distribución también es uniforme dentro del betón) serán responsables del incremento de la recuperación elástica del mismo.

Análisis de fases

Una vez analizada la topografía de la microestructura de los distintos ligantes, se estudiaron también las imágenes del contraste de fases de los distintos betunes.

En primer lugar, en la Figura 97 se encuentran contrapuestas las imágenes correspondientes al betún base frente al betún modificado con polietileno procedente del reciclaje doméstico (LDPE). Se puede ver de forma clara cómo, tal y como se indicaba en las imágenes topográficas, la superficie del betún se modifica sustancialmente siendo muy difícil distinguir estructuras de tipo abeja como las presentes en el betún convencional. Estas estructuras, de tamaño mucho menor debido al consumo de aromáticos durante el proceso de modificación del ligante, se encuentran imbuidas dentro de una fase uniformemente distribuida en toda la superficie e indicativa de la presencia del polietileno. Es esta fase la que aporta un comportamiento más rígido al betún y su mayor resistencia a las deformaciones a altas temperaturas.

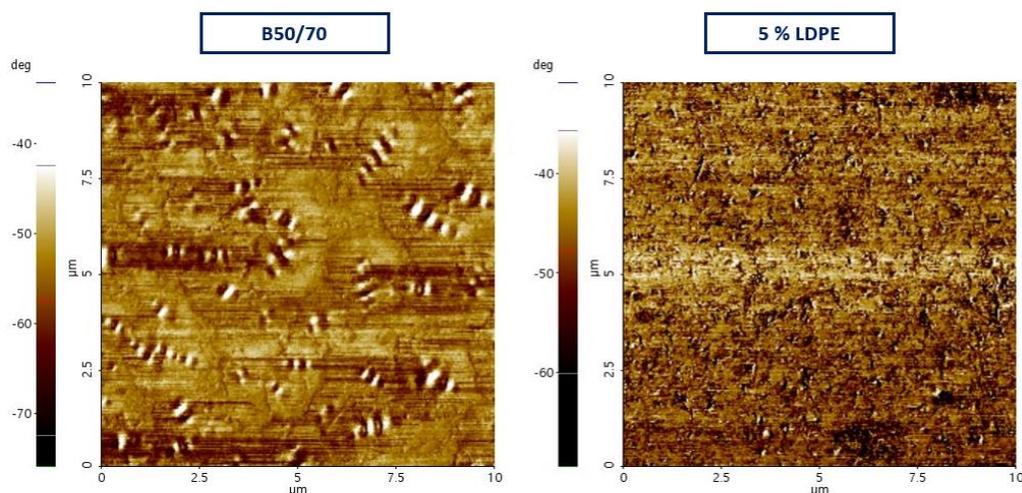


Figura 97. Comparativa entre las distintas fases del betún base y el modificado con LDPE de uso doméstico.

Por otra parte, si se compara el betún base con el polietileno lineal procedente de geomembrana (LDPE GEO) (Figura 98), de nuevo se dejan de apreciar las estructuras características de los betunes convencionales dando paso a una distribución de estructuras homogénea, pero mucho más compleja. En este sentido, la estructura que ocupa gran parte de la superficie y en cierta medida oculta otras estructuras, es la formada por las fibras presentes en este material las cuales hacen que este tenga una rigidez superior a la de la otra tipología de polietileno. Dentro de esta, se aprecian elementos de un color más claro correspondientes al polietileno subyacente a la misma.

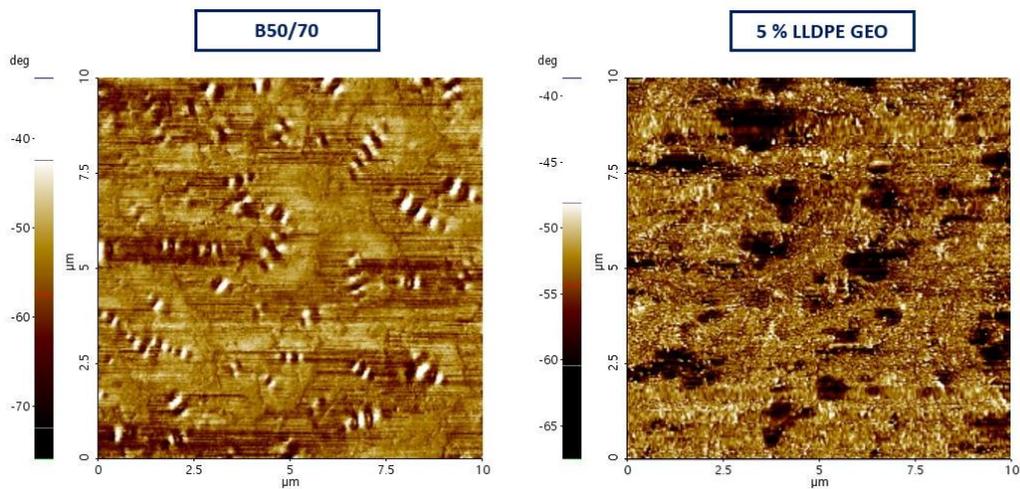


Figura 98. Comparativa entre las distintas fases del betún base y el modificado con LLDPE procedente de geomembrana.

Con el objetivo de que la diferencia entre las dos tipologías de polietileno quede más clara, en la Figura 99 se muestra la comparativa de ambos mediante imágenes donde el contraste de fases se muestra en una escala de colores realzada proporcionada por el software de análisis.

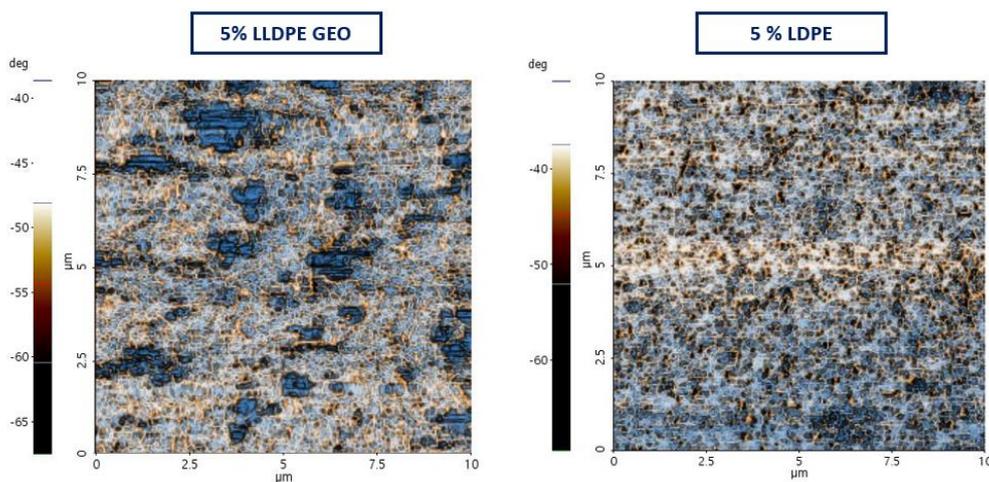


Figura 99. Comparativa entre las distintas fases de los dos tipos de polietileno reciclado estudiados.

De esta forma, tanto en la fase correspondiente a las fibras como en toda la superficie del betún modificado con polietileno de consumo doméstico se puede apreciar en color naranja una estructura reticular uniformemente distribuida y correspondiente al polietileno. En ambos casos la presencia de esta red es la responsable del comportamiento más rígido del ligante. La uniformidad con la que esta está integrada en el betún (dentro del residuo de geomembrana la diferencia de escala impide verla fuera de la zona de fibras) por su parte, es la responsable de que el betún obtenido sea estable al almacenamiento y muestre una recuperación elástica superior a la del betún base (aunque sin alcanzar los niveles obtenidos con el empleo de elastómeros).

Finalmente, si se comparan las imágenes de fase del betún base con las obtenidas para el betún modificado con la combinación de polietileno y caucho reciclados (LDPE + PNFVU), en la Figura 100, se puede comprobar la complejidad de las estructuras producidas por la combinación de los distintos materiales.

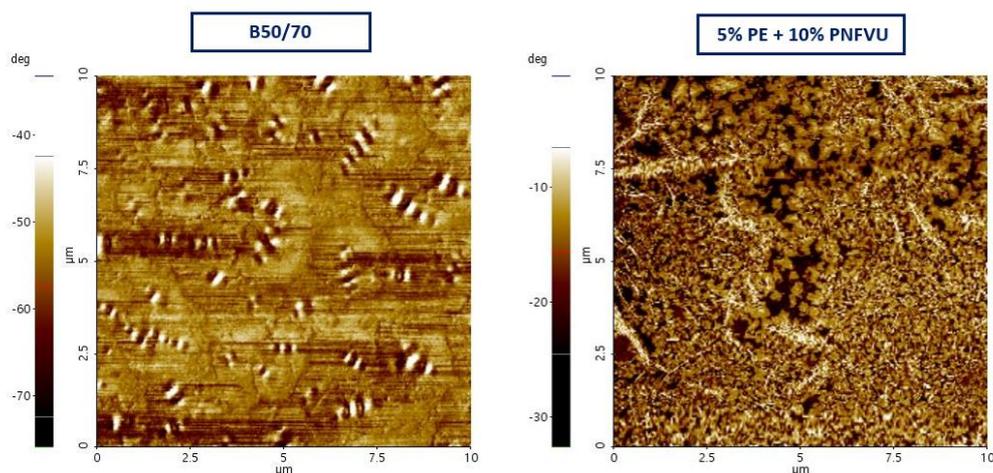


Figura 100. Comparativa entre las distintas fases del betún base y el modificado con la combinación de polietileno y caucho reciclados.

Así las típicas formaciones del betún base dan paso a un gran número de formaciones distintas donde se combinan elementos de forma reticular conteniendo las partículas de caucho de menor tamaño. Los componentes de estas, mezclados con los del betún, dan lugar a una importante reducción en el tamaño de la para-phase y una integración entre las cathana y periphases que dejan de ser visibles como tales. La desaparición de estos elementos, también observada en otros estudios para distintos polímeros (Pauli et al. 2010, Aguiar-Moya et al. 2015), confirmaría, en cierta medida, su relación con los componentes aromáticos los cuales, como se ha referido en el capítulo de revisión del estado del arte, juegan un papel importante en la

integración de los polímeros (especialmente el caucho) y el betún (Becker, 2001; Celauro et al., 2012; Del Barco-Carrión et al., 2016).

5.1.2.2 Evaluación de la resistencia al envejecimiento de ligantes modificados con polímeros reciclados

Realizada la caracterización de los distintos betunes modificados y establecida la mejora que suponen con respecto al betún base, así como la posibilidad de obtener betunes estables durante su almacenamiento, el siguiente paso para evaluar la viabilidad técnica del empleo de este tipo de material fue conocer la evolución de sus propiedades con el paso del tiempo.

En la Figura 101 se puede observar el aspecto del ligante base y los ligantes modificados tras la simulación del envejecimiento mediante los ensayos de RTFOT y PAV. Es posible apreciar como el aspecto del ligante base sufre poca variación mientras que, en los ligantes modificados con polímeros, se pueden observar distintas tonalidades (marrones y negras) vinculadas al envejecimiento diferencial entre la fase de betún y la de los polímeros. Este fenómeno es apreciable en mayor medida tras el ensayo RTFOT. Después del ensayo PAV, el aspecto es más homogéneo, aunque existe una rugosidad mayor vinculada a la presencia de las fibras en el residuo de geomembrana y al caucho en la combinación de LDPE y PNFVU. No obstante, una vez homogeneizado el betún, este vuelve a presentar un aspecto uniforme y las fases vuelven a estar totalmente integradas.

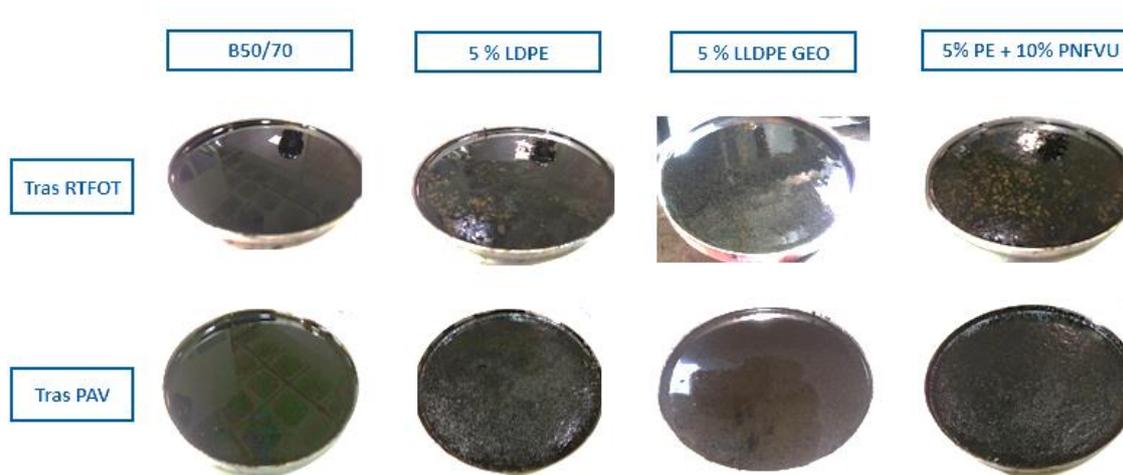


Figura 101. Aspecto de los ligantes base y modificados tras los ensayos RTFOT y PAV.

Propiedades básicas de los ligantes modificados envejecidos

Penetración y temperatura de reblandecimiento

En relación con las propiedades básicas de los ligantes, en la Tabla 30 se puede observar cómo la penetración de todos ellos se reduce tras el envejecimiento y su punto de reblandecimiento

aumenta. Este proceso está ligado a los cambios producidos en la química del betún debido a los mecanismos de envejecimiento expuestos y que tienen como efecto más evidente la rigidización del material (Tauste et al. 2018b). Las variaciones son más marcadas en el caso de la penetración que para la temperatura de envejecimiento

Tabla 30. Variación de penetración y temperatura de reblandecimiento tras el envejecimiento.

Ligante	Penetración (dmm)	Temperatura rebland. (°C)	Δ Penetración (%)	Δ Temperatura rebland. (%)
B50/70 RTFOT + PAV	15	73	-71.0	40.0
PMB 45/80-65 RTFOT + PAV	19	85	-65.4	30.5
B50/70 5% LDPE RTFOT + PAV	14	73.5	-51.6	21.1
B50/70 5% GEO LLDPE RTFOT + PAV	10	82	-54.8	32.7
B50/70 5% LDPE + 10% PNFVU RTFOT + PAV	15	79.5	-42.3	1.9

En relación a los ligantes modificados con polímeros reciclados, se puede apreciar como las variaciones con respecto a sus propiedades antes del envejecimiento son mucho menores que las del betún base (B 50/70), llegando incluso a mejorar el comportamiento en relación al betún modificado en refinería (PMB 45/80-65). Así, pese a partir de una rigidez mayor, los betunes modificados con polímeros reciclados presentan, en relación a las propiedades básicas, una mayor resistencia al envejecimiento, coincidiendo con lo encontrado en otros estudios (Punith et al. 2011, Bala et al. 2016).

Mención aparte supone el betún modificado con la combinación de LDPE y PNFVU. Para este, se alcanzan tras el envejecimiento unos valores similares a los encontrados para el betún base (B50/70) o aquel que incorpora únicamente el polietileno (LDPE). No obstante, al partir de una penetración original menor, se comprueba cómo la resistencia al envejecimiento de este material es considerablemente mayor (muestra menos variación en términos de penetración y punto de reblandecimiento). Esto puede guardar relación con componentes presentes en el polvo de neumático como el negro de carbón que, a menudo, pueden tener efectos antioxidantes (Tauste et al. 2018b).

Viscosidad dinámica

En relación a la viscosidad, en la Tabla 31 se muestran los valores de viscosidad a la temperatura de trabajo de los ligantes estudiados (165 °C) tras el envejecimiento, así como la variación con respecto a los mismos sin envejecer. En ella, se puede apreciar cómo el ligante modificado con

polímeros en refinería (PMB 45/80-65) es el más afectado por el envejecimiento, presentando los betunes modificados con polietileno (LDPE y LLDPE GEO) una cierta reducción del incremento de viscosidad si se compara con el betún base (B50/70).

Tabla 31. Viscosidad de los distintos ligantes tras envejecimiento y variación de la misma respecto a los originales.

Ligante	Viscosidad después envejecimiento (Pa·s)	Δ Viscosidad (%)
B50/70	0.47	261.5
PMB 45/80-65	2.12	342.9
B50/70 5% LDPE	0.91	255.1
B50/70 5% GEO LLDPE	1.63	232.7
B50/70 5% LDPE + 10% PNFVU	4.35	69.2

Por otra parte, el betún modificado con la combinación de polietileno y caucho reciclados (LDPE + PNFVU), pese a su mayor viscosidad inicial, es el menos afectado por el envejecimiento. Esto está en sintonía con lo observado previamente para la penetración y temperatura de reblandecimiento, e indica que este material resiste mejor los efectos de la oxidación. No obstante, también hay que considerar la degradación de las partículas de caucho con el envejecimiento que hacen que la viscosidad disminuya al tener estas un tamaño menor.

Caracterización reológica de los ligantes modificados envejecidos

Entrando ya en el estudio de la reología de los distintos ligantes, al igual que ocurría antes del envejecimiento, el primer análisis realizado se centra en la representación del ángulo de fase frente al módulo complejo de rigidez de los distintos ligantes a través de los Diagramas de Black (Figura 102). Lo primero que se puede apreciar es que, en todos los casos, las curvas de los distintos ligantes sufren un desplazamiento hacia abajo y a la derecha si comparamos con las curvas antes del envejecimiento (Figura 92) lo que indica un comportamiento más rígido y elástico de los mismos, en sintonía con lo que ya indicaban los resultados de penetración y punto de reblandecimiento ().

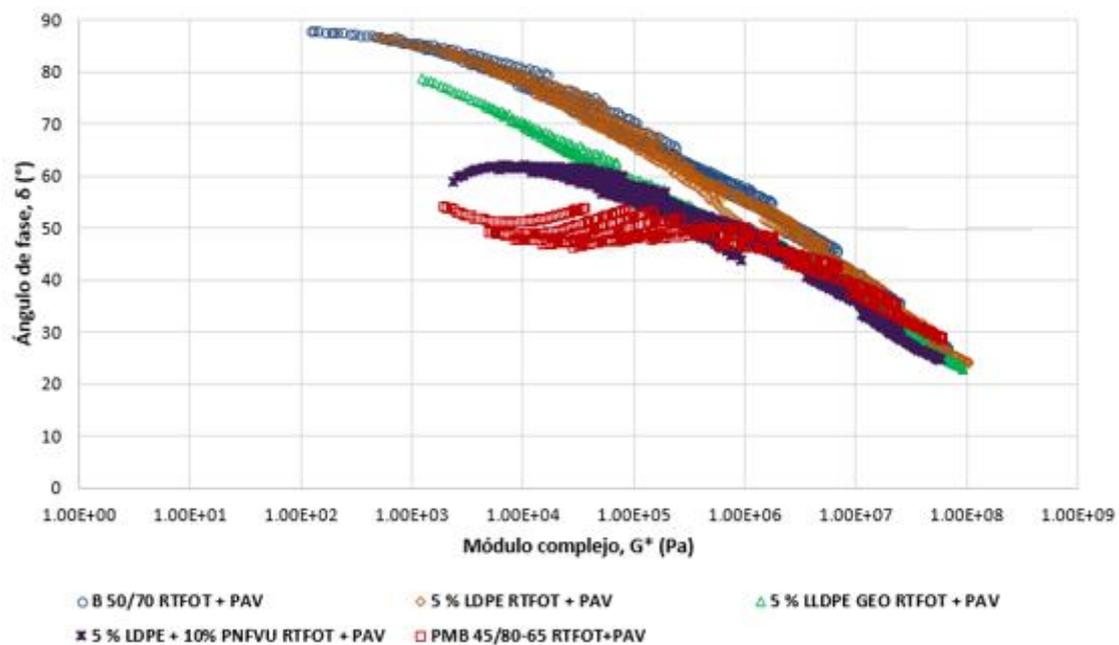


Figura 102. Diagramas de Black de los distintos ligantes tras el proceso de envejecimiento.

Sin embargo y pese a la tendencia general, sí se pueden apreciar ciertas diferencias entre el modo en el que los distintos ligantes reaccionan al proceso de envejecimiento. Mientras que en el caso de los ligantes sin envejecer los polímeros reciclados más complejos (el procedente de geomembrana y la combinación con polvo de caucho) presentaban el mayor nivel de rigidez con mayores valores de módulo (aunque con distinto comportamiento elástico), en este caso, la presencia de componentes que ayudan a ralentizar las dinámicas de envejecimiento (aditivos antioxidantes en el caso del residuo de geomembrana y el propio caucho en la combinación de polímeros reciclados) conduce a dinámicas distintas.

Así, el betún que incorpora polietileno lineal procedente de geomembrana alcanza, en este caso, un nivel de rigidez algo menor que el polietileno de consumo doméstico pese a la presencia de fibras en el primero, que sí hace que este tenga un ángulo de fase menor que el polietileno lineal de baja densidad (LDPE). En el mismo sentido, la rigidez del ligante combinación de LDPE y PNFVU, se mantiene dentro de un mismo rango para las distintas condiciones (frecuencia y temperatura) que el ligante modificado de referencia (PMB 45/80-65) y menor que el resto de polímeros, lo que indica una menor rigidización del ligante y una menor susceptibilidad al envejecimiento del mismo.

Por último, si atendemos a la forma de la curva de este ligante, observamos que la caída del valor de ángulo de fase a las temperaturas más altas es menos marcada que en el ligante antes

de envejecer (del orden de 5 grados frente a los casi 15 mostrados antes del envejecimiento, Figura 92). Esto confirma la teoría de que dicha caída se debe a la prevalencia de una fase polimérica frente a la del betún a las temperaturas más altas, ya que la degradación de los polímeros ocurrida debido al envejecimiento hace que el tamaño de las partículas dispersas en la matriz del betún sea menor y, con ello, su influencia en el comportamiento sea menos marcada.

Entrando a evaluar la evolución de los ligantes envejecidos con la temperatura, en la Figura 103 se representan las isocronas a 5 Hz en términos de módulo de rigidez complejo (G^*) y ángulo de fase (δ). En ella se puede observar cómo, tal y como indicaban los diagramas de Black, todos los ligantes sufren en mayor o menor medida un proceso de rigidización asociado a los cambios químicos ocurridos en el betún y los polímeros.

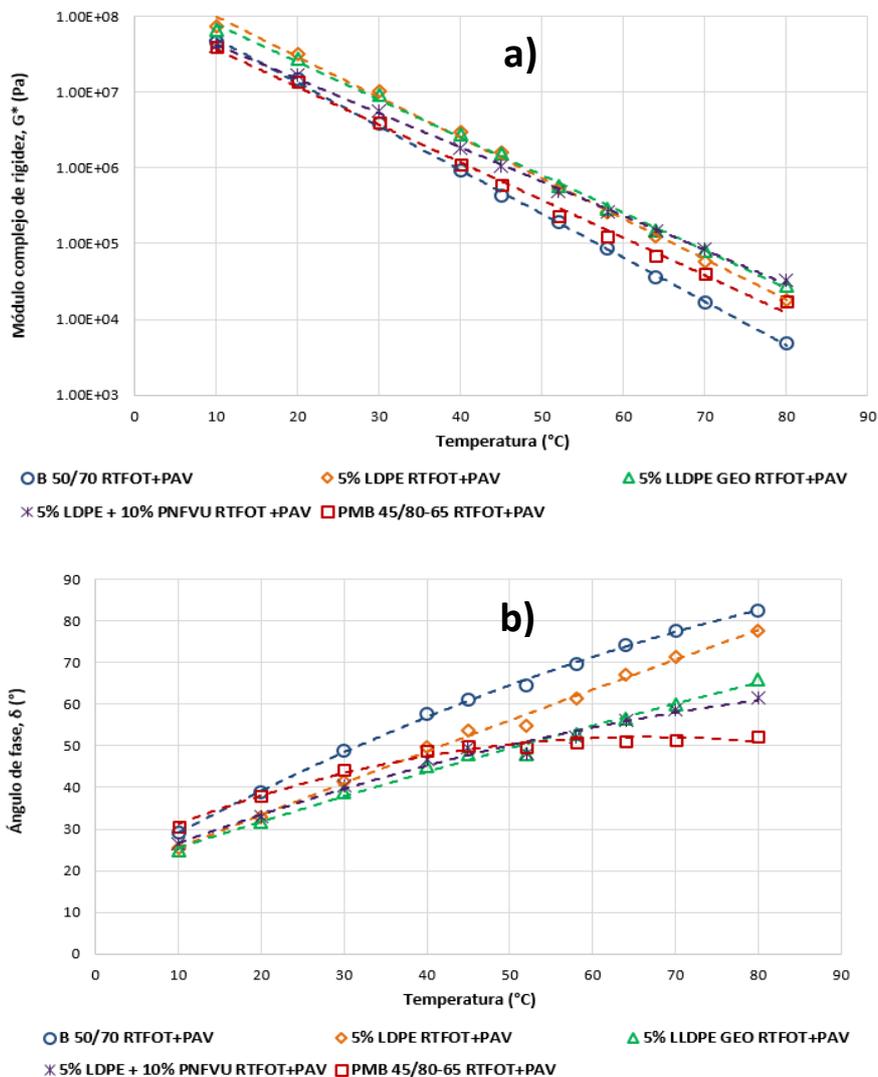


Figura 103. Isocronas a 5Hz de los distintos betunes envejecidos a distintas temperaturas. a) Evolución del módulo de rigidez complejo (G^*). b) Evolución del ángulo de fase (δ).

En este sentido, al igual que ocurría en los ligantes sin envejecer (Figura 93) los betunes modificados con polímeros reciclados presentan los niveles más altos de rigidez. No obstante, mientras que para los ligantes que incorporan los dos tipos de polietileno (LDPE y LLDPE procedente de geomembrana) la diferencia con el ligante modificado de referencia permanece constante, en el caso de la combinación con caucho (LDPE + PNFVU) el aumento se produce de manera progresiva. Así, la rigidez es similar a la del residuo de geomembrana a las temperaturas más altas (dotando de una elevada resistencia a las deformaciones permanentes), pero considerablemente menor a las temperaturas más bajas de manera más similar al ligante modificado de referencia (PMB 45/80-65). Esta última consideración es importante porque será en las temperaturas más bajas en las que exista un mayor riesgo de fisuración vinculada a la excesiva rigidez del ligante envejecido.

En cuanto al ángulo de fase, todos los ligantes muestran en todo el rango de temperaturas de ensayo un comportamiento, menos viscoso y más elástico. Las diferencias entre los distintos ligantes tienden a hacerse más marcadas a medida que la temperatura es mayor y el material (más rígido tras el envejecimiento) es capaz de mostrar la acción de los distintos componentes de los que está formado. De esta forma, comienzan a observarse las diferencias tanto entre el betún base (B 50/70) y el betún modificado de referencia (PMB 45/80-65), como entre estos y los ligantes modificado con polímeros reciclados.

En relación a estos últimos, tras el envejecimiento, los ángulos de fase del ligante modificado con polietileno de geomembrana (LLDPE GEO) y el de la combinación de polietileno y caucho (LDPE + PNFVU) son muy similares entre sí mostrando un comportamiento más elástico que el betún modificado únicamente con polietileno procedente de consumo doméstico (LDPE). El análisis realizado más adelante con los resultados del ensayo MSCRT, ayudó a determinar si este comportamiento más elástico también se relaciona con una mayor recuperación elástica del material y permitió cuantificar la resistencia térmica y al envejecimiento de los distintos ligantes.

Índices reológicos para la evaluación del envejecimiento

Los resultados de reología previamente mostrados permiten completar la valoración inicial aportada por los ensayos de caracterización básica. No obstante, en el caso del envejecimiento existen distintos análisis (Crossover-frequency, R-value, G-R parameter) que, a través de la valoración de la rigidez del ligante en las condiciones más desfavorables permiten precisar cuál será el comportamiento de los betunes modificados durante toda su vida de servicio y si su empleo puede ocasionar algún tipo de detrimento a las mezclas bituminosas que los incorporan.

Crossover-frequency y R-value

Comenzando con la evaluación de la Crossover-Frequency para un ángulo de 45°C y el R-value, en la Figura 104 se encuentran representados los valores de estos parámetros para los distintos ligantes antes y después de ser sometidos al envejecimiento mediante los ensayos RTFOT y PAV. Según este tipo de análisis, cuanto mayor es el valor de frecuencia y menor el de R-value, menor es también el nivel de envejecimiento del ligante a la temperatura de ensayo. En este caso, para la temperatura de 15 °C, a partir de la cual pueden producirse problemas de fisuración en la mezcla bituminosa debido a la excesiva fragilidad de esta consecuencia de una excesiva rigidez del ligante.

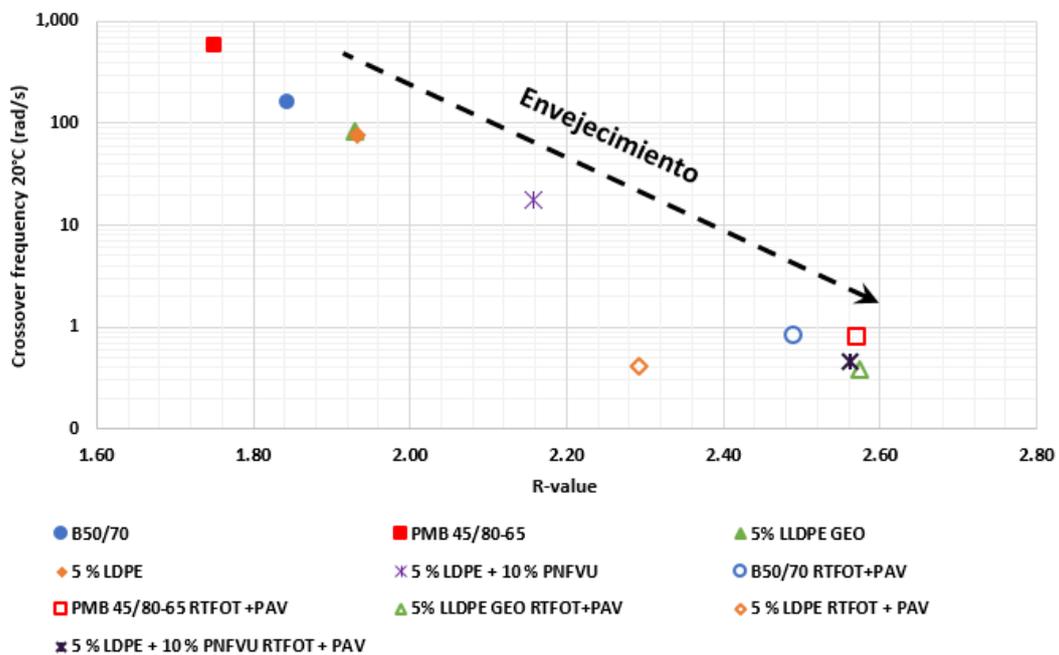


Figura 104. Crossover-Frequency y R-value de los distintos ligantes antes y después del envejecimiento.

De esta forma, si se observa el gráfico, para todos los ligantes los valores de la frecuencia de cruce (Crossover-frequency) son mayores y los de R-Value menores que los obtenidos tras simular el envejecimiento mediante los ensayos de RTFOT + PAV. Distinguiendo entre tipologías, se puede apreciar cómo el ligante modificado comercial (PMB 45/80-65) es el menos susceptible, a priori, a presentar problemas de fisuración. Del mismo modo, resulta claro como la adición de los distintos polímeros reciclados trae consigo un comportamiento más elástico de los ligantes que conlleva mayores valores de R-value y crossover-frecuencias más bajas con respecto del ligante base (B50/70). Esto ocurre de manera más proporcional al contenido total

de polímero empleado que al tipo de polímero ya que, como se puede apreciar, los distintos tipos de polietileno (LDPE y LLDPE GEO) muestran un comportamiento muy similar.

Sin embargo, sí se aprecian diferencias significativas en el comportamiento de los distintos ligantes tras el proceso de envejecimiento. Aunque las frecuencias más bajas siguen siendo las de los ligantes modificados con polímeros reciclados, si se observan variaciones entre los dos tipos de polietileno (LDPE de consumo doméstico y LLDPE procedente de geomembrana) con valores más altos de R-value en el caso del polietileno lineal de baja densidad. En este caso, la presencia de las fibras de poliéster presentes en la geomembrana tienden a incrementar en mayor medida la rigidez del material tras el envejecimiento (como mostraban los resultados de los barridos de frecuencia (Figura 102)) explicando el mayor valor de R-value.

En cualquiera de los casos, este valor similar también al del betún modificado con la combinación de caucho y polietileno (LDPE + PNFVU), es del mismo orden que el obtenido para el betún modificado con polímeros en refinería (PMB 45/80-65). Esto indica, puesto que estos betunes partían de valores mucho más altos de R-value y más bajos de Crossover-Frequency, una menor susceptibilidad al envejecimiento que los betunes de referencia, confirmando lo hallado en otros trabajos como el de Singh et al 2017.

Glove-Rowe parameter

De manera similar, en la Figura 105 se encuentran representados en un espacio de Black los valores de Glove-Rowe parameter de los distintos ligantes estudiados, antes y después de ser sometidos al proceso de envejecimiento. Estos valores son obtenidos a través de las curvas maestras de módulo a 15°C y para una frecuencia angular de 0.005 rad/s. La representación en este espacio permite, además, como se puede observar, delimitar dos zonas que indican el riesgo de inicio de daño y de fisuración significativa a bajas temperaturas de las mezclas que incorporan los betunes estudiados.

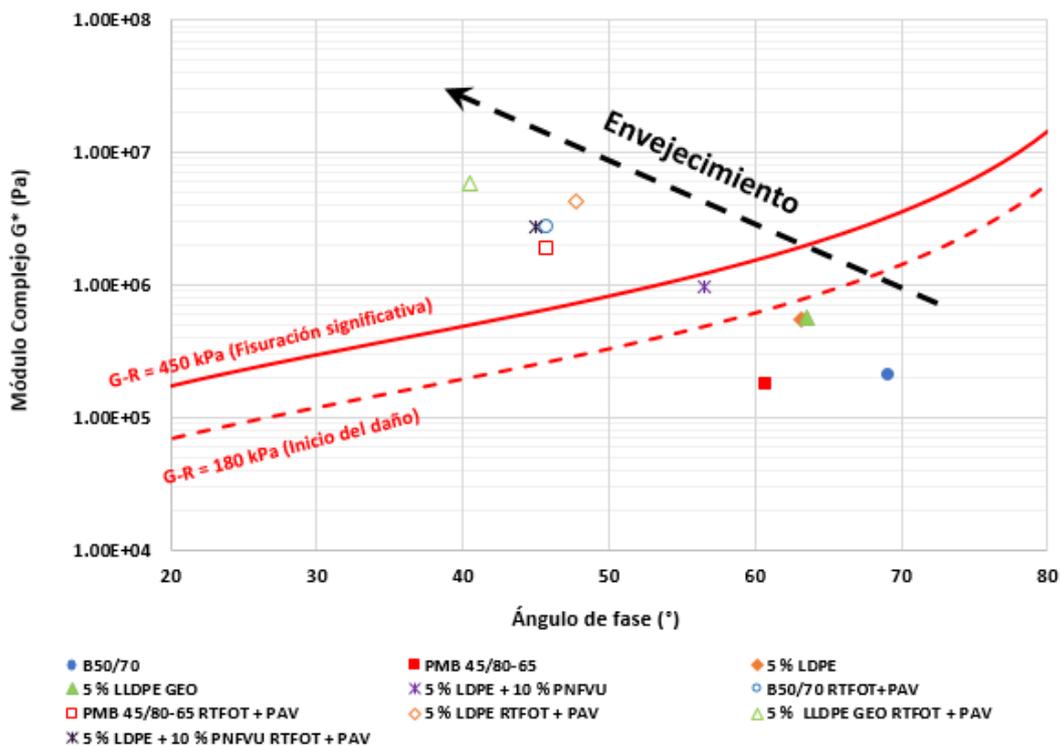


Figura 105. Representación de Glove-Rowe parameter de los distintos ligantes antes y después del envejecimiento.

Siguiendo la tendencia observada cuando se estudiaban los parámetros de Crossover-frequency y R-value se aprecia que, antes del envejecimiento, la rigidez aportada por los polímeros incorporados los hace más susceptibles de presentar fisuración, aunque en el caso de ambos tipos de polietileno (LDPE de consumo propio y LLDPE procedente de geomembrana) ninguno de los dos se encuentra en la zona que delimita el inicio del daño debido a este fenómeno.

Por el contrario, el betún que incorpora la combinación de LDPE y PNFVU, sí presenta riesgo de inicio del daño por fisuración, debido a la elevada rigidez y comportamiento más elástico (menor ángulo de fase) de este material. No obstante, y pese a que esto podría indicar un comportamiento más frágil a bajas temperaturas, este tipo de análisis se centra en evaluar las condiciones de módulo de rigidez (G^*) y ángulo de fase para la temperatura de análisis. La evaluación de la capacidad de recuperación del material a distintas condiciones de envejecimiento ayudará a precisar la resistencia efectiva del mismo.

Más allá de estas consideraciones, observando el comportamiento de los distintos ligantes tras el envejecimiento, de nuevo se pueden apreciar unas tendencias similares a las obtenidas en el análisis de Crossover-Frequency y R-value donde todos los ligantes se rigidizan de manera significativa pero aquellos modificados con LDPE y, sobre todo, la combinación de LDPE + PNFVU envejecen notablemente menos que los betunes de referencia.

De nuevo aquí, tal y como ocurría con el R-value (Figura 104) el betún modificado con LLDPE procedente de geomembrana es el que se rigidiza en mayor medida. No obstante, el análisis incluido en el último apartado de esta sección empleará la evaluación reológica de la capacidad de recuperación elástica de los ligantes, a través del ensayo MSCR aplicado a distintas condiciones ambientales, como medio para precisar la contribución de las fibras contenidas en el material y la recuperación elástica aportada por el polvo de neumático tras el envejecimiento.

Análisis de la microestructura de los betunes modificados envejecidos

Junto con los efectos observados en las propiedades básicas de los betunes y su comportamiento reológico, el envejecimiento de los mismos también afecta a su microestructura ya que tanto la matriz de betún como los distintos polímeros se ven sometidos a distintos grados de degradación durante el proceso.

Análisis topográfico

De esta forma, en primer lugar, la Figura 106 se muestra las imágenes topográficas que permiten observar las distintas estructuras que aparecen en la superficie de los diferentes betunes tras el envejecimiento.

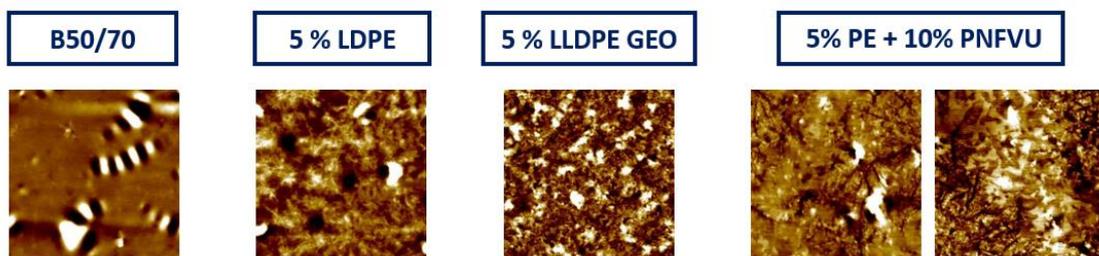


Figura 106. Imágenes topográficas de AFM de la microestructura de los distintos betunes tras su envejecimiento (RTFOT + PAV).

Se puede así apreciar que las estructuras de abeja que aparecían el betún base previo a su envejecimiento aún están presentes en el mismo. No obstante, estas aparecen en menor número y se puede constatar cómo el aspecto del resto de la superficie es más homogéneo que en el caso del betún original, donde sí resultaba más fácil distinguir en este tipo de imágenes la peri-phase y la para-phase.

En el caso del betún modificado con polietileno procedente del reciclaje doméstico (LDPE), la tipología de las estructuras observadas resulta similar a la encontrada antes del envejecimiento. Esto puede ser indicativo de una mayor resistencia a este fenómeno pese a que los distintos elementos aparecen algo menos marcados. En contraste con los cambios previamente descritos,

el betún modificado con residuo de geomembrana (LLDPE GEO) presenta una microestructura prácticamente idéntica a la que ya aparecía antes del envejecimiento indicando que las fibras condicionan en buena medida la microestructura de este ligante.

Por último, y para la combinación del polietileno y el polvo de caucho (LDPE + PNFVU), se observa en la zona de partículas de mayor tamaño que el contraste ya no es tan pronunciado como antes del envejecimiento, lo que señala la reducción del tamaño de estas durante el proceso. En la zona dominada por el betún, de nuevo encontramos la microestructura más compleja de entre las distintas tipologías estudiadas, siendo posible observar desde las estructuras reticulares vinculadas al polietileno como elementos más claros relacionados con la presencia de las partículas de caucho integradas en el betún.

En cuanto al tamaño de las distintas estructuras, en la Figura 107, se muestran las imágenes tridimensionales de la topografía previamente descrita. Para el betún base, las estructuras de abeja mostradas mantienen un nivel de altura muy similar a las que aparecían originalmente, aunque, tal y como se apreciaba anteriormente, el resto de la superficie aparece totalmente plano indicando la desaparición de la diferencia entre el resto de elementos como producto del envejecimiento.

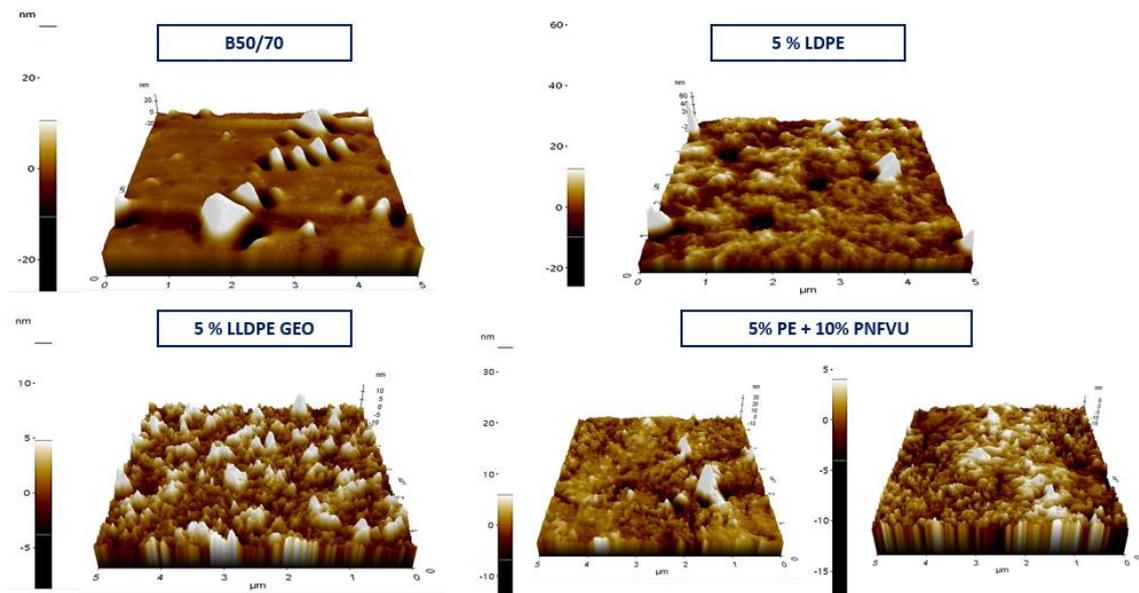


Figura 107. Imágenes topográficas tridimensionales de la microestructura de los distintos betunes tras su envejecimiento.

En cuanto al betún modificado con LDPE, aunque en términos generales la rugosidad también se reduce ligeramente (presumiblemente por la degradación del polímero), la aparición de estructuras de abeja hace que existan elementos de mayor altura dentro de la superficie del ligante. El betún modificado con geomembrana, por su parte, muestra un tamaño de estructura

análogo al que ya tenía antes de envejecer confirmando el dominio de las fibras en la topografía de la superficie del material.

Para el betún modificado con la combinación de polímeros (LDPE + PNFVU), se reduce el tamaño máximo de las partículas de caucho encontradas tal y como refieren otros estudios que emplean este material como modificador (Shen, 2015). En la zona donde domina la fase del betún, aunque la rugosidad media es similar, el contraste entre las zonas de polietileno y las de caucho es más marcada aun presentando, no obstante, todavía un aspecto uniforme.

Análisis de fases

Tras analizar la topografía, en las siguientes figuras se muestra una comparativa entre las fases de los distintos betunes antes y después del envejecimiento.

En la Figura 108 se establece la comparación para el betún base (B 50/70). Se aprecia cómo se reduce el número de estructuras de abeja y se elimina la diferencia entre el resto de fases tal y como refieren estudios como el de Zhang et al. (2012) debido al consumo de aromáticos y resinas durante el proceso y a la generación de asfaltenos asociados al envejecimiento. Dichos cambios relacionan la mayor rigidez encontrada en este tipo de betún con los cambios químicos y microestructurales del mismo. La longitud de las estructuras de abeja también se modifica siendo estas más largas tras el proceso de envejecimiento, lo cual está en sintonía con lo encontrado en otros estudios (Wu et al., 2009; Cannone-Falchetto, Alisov, Goeke, & Wistuba, 2016).

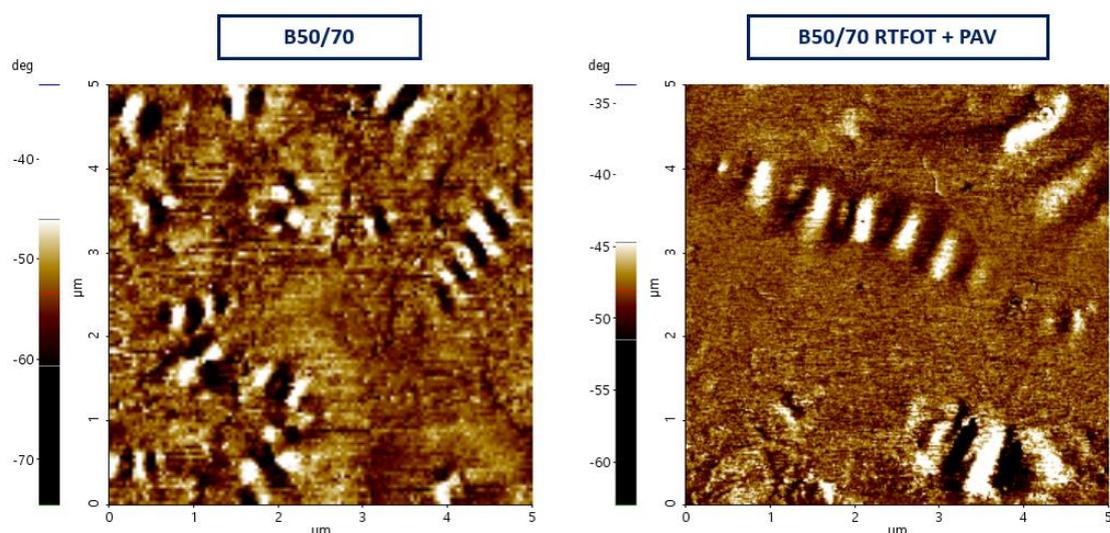


Figura 108. Comparativa entre las fases del betún base (B 50/70) antes y después del envejecimiento (RTFOT + PAV).

En cuanto al betún modificado con polietileno reciclado de uso doméstico, en la Figura 109 se puede observar cómo tras el envejecimiento la densidad de la red polimérica es mucho menor fruto de la degradación del polímero. Con ello, el aspecto del material es más homogéneo, aunque llegan a apreciarse distinciones de color en aquellas zonas donde no hay polietileno.

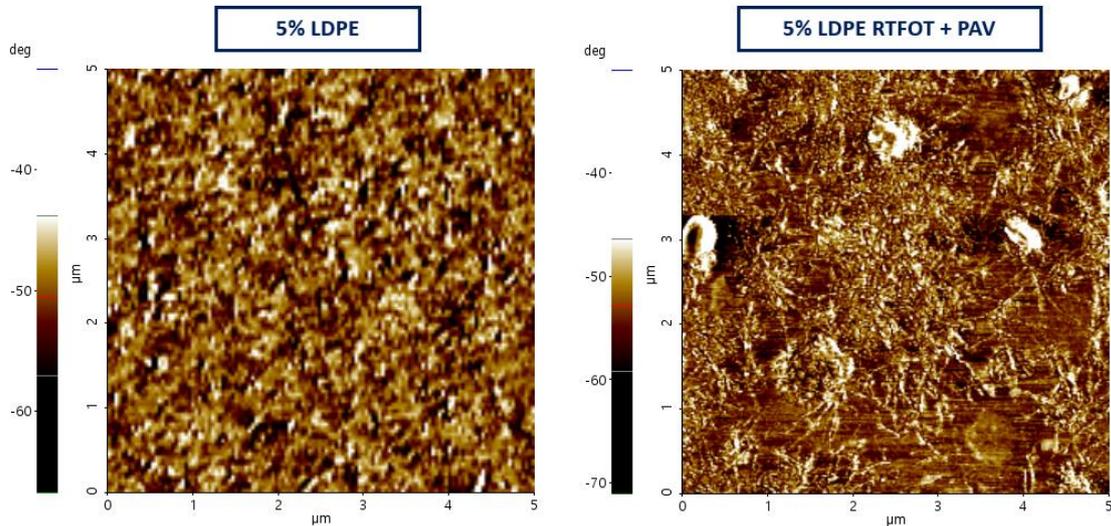


Figura 109. Comparativa entre las fases del betún modificado con polietileno de uso doméstico (LDPE) antes y después del envejecimiento (RTFOT + PAV).

Esto indica un comportamiento menos degradado (y por tanto menos envejecido) que en el caso del betún base donde no era posible distinguir fases distintas más allá de las estructuras de abeja. Las estructuras de abeja de este betún son de menor tamaño que las del betún base y también aparecen más difuminadas dentro de la red polimérica, aunque al igual que en el betún original, su longitud crece si se compara con su homólogo sin envejecer.

Las distintas fases del betún modificado con el polietileno procedente de geomembrana (LDPE GEO) se muestran en la Figura 110. En la misma se observa que, tal y como indicaban las imágenes topográficas, existe muy poca variación entre el ligante antes y después de su envejecimiento observando la misma estructura dominada por la presencia de las fibras en el material.

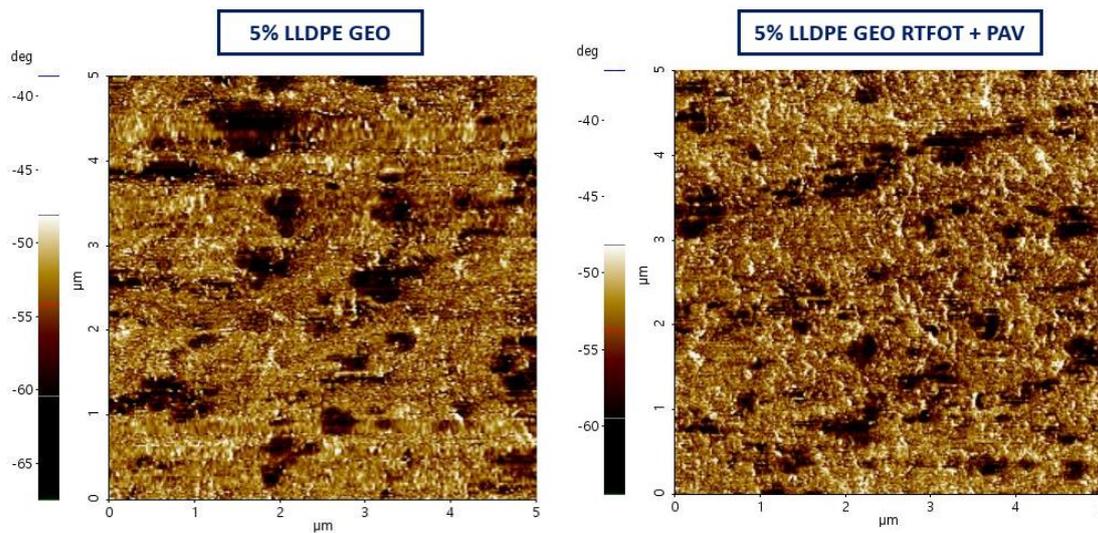


Figura 110. Comparativa entre las fases del betún modificado con polietileno procedente de geomembrana (LLDPE GEO) antes y después del envejecimiento (RTFOT + PAV).

Estas fibras parecen sufrir poca degradación durante el envejecimiento (ya que aparecen de manera análoga en ambas muestras) condicionando, tal y como se observaba en el análisis reológico, la rigidez del ligante. Al no degradarse, la rigidez aportada por este material se sumará a la propia del betún al envejecer dando lugar a valores más altos de los que aparecerían de modo efectivo dentro de la mezcla.

Por otra parte, las fibras ejercen en cierto modo de elemento de escudo, de manera similar al mecanismo de acción de algunos aditivos anti envejecimiento con los de tipo montmorillonita o los bloqueadores ultravioleta que por su estructura impiden el acceso del oxígeno y la radiación UV, minimizando el envejecimiento (Tauste et al. 2018b).

Finalmente, en la Figura 111 se puede apreciar la diferencia de fases producida tras el envejecimiento del betún modificado con la combinación de polietileno y caucho reciclados. Observando ambas imágenes, se puede apreciar como la estructura reticular del polietileno aparece en las dos, pero el contraste entre el resto de fases varía.

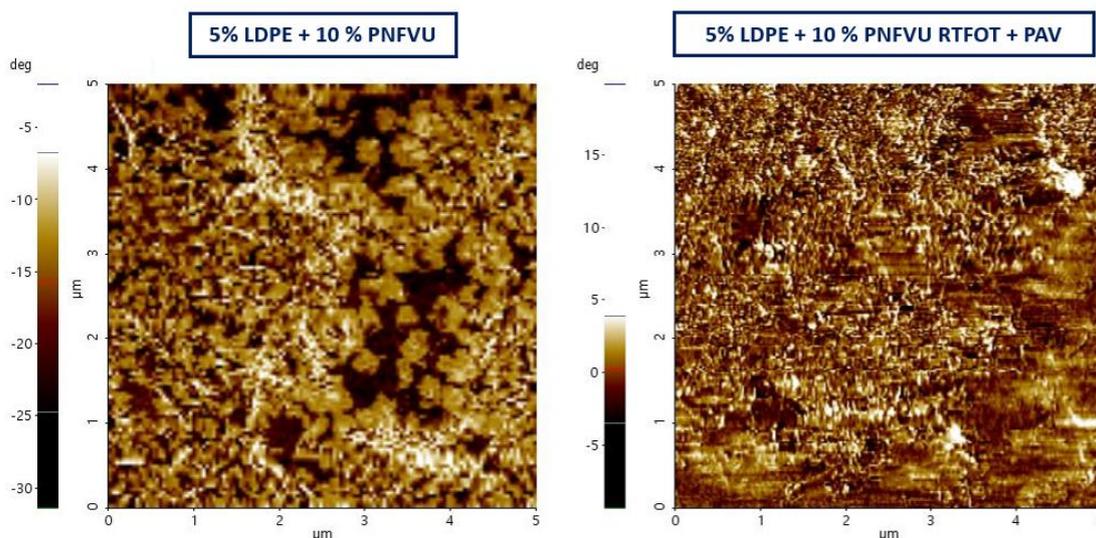


Figura 111. Comparativa entre las fases del betún modificado con la combinación de polietileno (LDPE) y caucho (PNFVU) reciclados antes y después del envejecimiento (RTFOT + PAV).

El caucho sometido a temperatura y presión durante el envejecimiento incrementa su integración con el resto de componentes tal y como han referido otros estudios (Kim et al. 2017). De este modo, aunque el caucho aún se presenta distribuido en partículas por toda la superficie, también contribuye a que, fuera de la zona delimitada por la red polimérica, se pueda observar un contraste entre distintas fases (fruto de la integración del betún con los componentes de los polímeros). Dicho contraste es mucho más marcado que en el caso del betún base y los modificados con polietileno (LDPE y LLDPE GEO) indicando una resistencia más marcada al envejecimiento fruto de persistencia de las proporciones entre los distintos componentes del betún (asfaltenos, resinas, aromáticos y saturados).

5.1.2.3 Análisis MSCRT para distintas condiciones ambientales

Con el objetivo de profundizar en la evaluación de la recuperación elástica y la resistencia a la deformación de los distintos ligantes, en este último apartado del análisis de la interacción entre betún y polímeros reciclados se evalúa el ensayo MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery). Para ello se presentan los resultados tanto del ensayo clásico como los obtenidos mediante la metodología desarrollada dentro del grupo de investigación LabIC.UGR para la evaluación de este frente a distintas condiciones ambientales y de envejecimiento (Moreno-Navarro et al. 2019).

En relación al ensayo clásico, en la Figura 112 se muestran los resultados de recuperación elástica y J_{nr} a 3.2 Kpa para los betunes estudiados a distintas temperaturas. Estos parámetros evalúan la capacidad de recuperar deformación de los ligantes y la resistencia de los mismos a

las deformaciones permanentes. Se puede apreciar cómo independientemente del betún considerado en todos los casos la recuperación elástica alcanzada por estos se reduce a medida que se incrementa la temperatura. Esto confirma el predominio de la fase de polímeros a medida que esta crece, estando las diferencias más vinculadas a la distinta naturaleza de los polímeros.

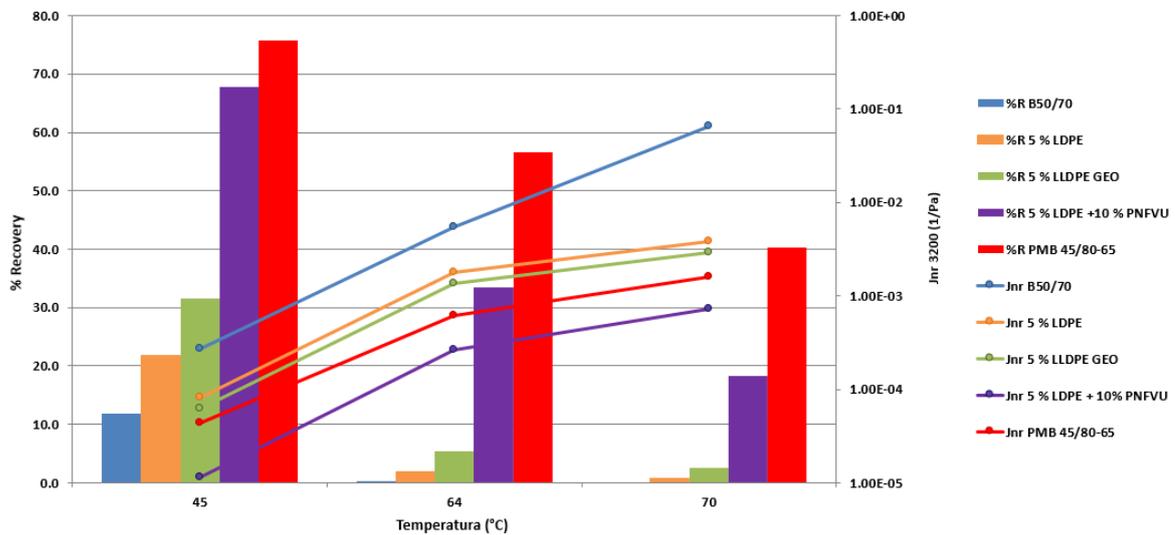


Figura 112. Porcentaje de recuperación (%R) y parámetro Jnr3.2 kPa obtenidos del ensayo MSCR a distintas temperaturas.

El betún modificado en refinería de referencia es el que aporta un mayor porcentaje de recuperación al contar en su composición con polímeros de tipo elastomérico como los de tipo SBS que aportan mucha más elasticidad que los plastómeros que constituyen la base de los betunes modificados con polímeros reciclados de esta tesis. Los plastómeros no aportan una gran elasticidad al ligante, pero cómo es posible observar, son capaces de mejorar la recuperación elástica respecto del betún base, más si cabe en el caso de la presencia de las fibras para el residuo de geomembrana (LLDPE GEO).

Mediante la combinación del polietileno con el caucho se logran recuperaciones que, aunque no alcanzan el nivel del betún modificado de referencia, si aportan una recuperación elástica más elevada. Esto indica además que, pese a resultar este ligante el más rígido de entre los modificados (Figura 93) su capacidad de recuperación contribuye a disminuir el efecto adverso de este factor en la fisuración por fatiga del material, más si cabe si observamos que a medida que la temperatura es menor (donde el material resulta más rígido) su comportamiento es más similar al betún PMB 45/80-65.

De igual modo y en relación a la evaluación de las deformaciones permanentes mediante el parámetro Jnr 3.2 kPa, de nuevo se puede apreciar cómo la adición de los dos tipos de polietileno

mejora considerablemente la respuesta del ligante cuando comparamos con el betún base (se obtienen valores menores) acercándonos a las propiedades del betún modificado de referencia (PMB 45/80-65), más si cabe en el caso del residuo de geomembrana, aunque sin alcanzar la resistencia de este.

Sin embargo, y al contrario de lo que ocurría en el caso del porcentaje de recuperación elástica, el comportamiento del betún modificado con polietileno y polvo de caucho (LDPE + PNFVU) no solo alcanza las prestaciones del ligante modificado en refinería (PMB 45/80-65), sino que mejora el grado de desempeño de este, resultando un betún muy resistente a las deformaciones permanentes.

Aplicación de nueva metodología de análisis MSCRT LabIC.UGR

Junto al análisis anterior, y como modo de precisar la susceptibilidad al paso del tráfico, a los cambios de temperatura y al envejecimiento ya observados en los distintos análisis presentados, se presentan, a continuación, los resultados obtenidos tras la aplicación de la metodología de análisis del ensayo MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery) desarrollada por Moreno-Navarro et al. (2019). Esta permite extender los resultados previamente mostrados al ámbito de los betunes envejecidos, cuantificando la recuperación elástica de manera más precisa y evaluando la resistencia a las deformaciones permanentes en términos de evolución en lugar de un parámetro medio (J_{nr}).

Resistencia al paso del tráfico

En primer lugar, en la Figura 113 se muestran los resultados del ensayo MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery) como una función de los parámetros Non-Recoverable Strain Rate ($\Delta\epsilon_{nr}$) y Average Recovered Strain (RS_{15-30}). Ambos permiten evaluar la respuesta del material de manera más estable que el método tradicional al considerar la acumulación de la resistencia a la deformación permanente y el promedio de la recuperación elástica en los últimos 15 ciclos (en lugar de un valor fijo). Empleando dichos parámetros es posible identificar el grado en el que los distintos betunes se ven afectados por las cargas del tráfico.

De esta forma, cuanto más cercanos al origen de coordenadas, y por tanto con menor Flow Index, menos se ven afectados por las cargas. Del mismo modo, aquellos ligantes con un valor de Recovery Capacity, alto ofrecerán un buen comportamiento frente a las deformaciones permanentes y a la fatiga producida por las cargas del tráfico. Así, se puede apreciar cómo cuando la capacidad de recuperación (Average Recovered Strain, RS_{15-30}) supera el valor indicativo de las deformaciones permanentes no recuperadas (Non-Recoverable Strain Rate, $\Delta\epsilon_{nr}$) los betunes se situarán por encima de la línea de puntos (Figura 113) y, a medida que se

alejan del origen (mayor Flow-Index), mejor es su comportamiento frente a la fatiga y las deformaciones permanentes.

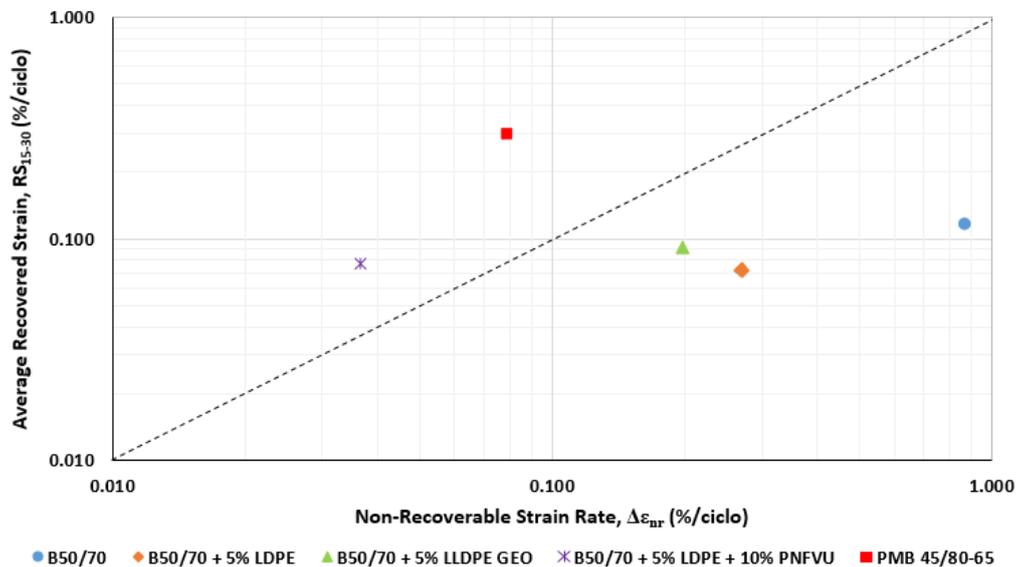


Figura 113. Resultados obtenidos para el ensayo MSCR a 45 °C empleando la metodología de análisis de Moreno-Navarro et al. (2019).

Siguiendo este planteamiento es posible observar como el betún base (B50/70) es el más afectado por las cargas del tráfico ya que, pese a que a la temperatura de 45°C el betún base y los betunes modificados con los distintos polímeros reciclados tienen un nivel de recuperación a las cargas similar (RS_{15-30} parecido), la parte de esas cargas que no se ve recuperada ($\Delta\epsilon_{nr}$) varía sustancialmente de unos a otros. De este modo, la adición de LDPE de uso doméstico reduce significativamente la componente de la deformación que no es recuperada, siendo esta reducción aún mayor en el caso del residuo de geomembrana (LLDPE GEO).

Finalmente, la combinación de polietileno y caucho reciclados (LDPE + PNFVU) aunque mantienen una proporción de deformación recuperada menor que la del ligante modificado de referencia (PMB 45/80-65), también reduce significativamente la deformación permanente soportada por el betún tras la aplicación de cargas. Esto está relacionado con la presencia de los dos tipos de polímeros (polietileno y caucho) los cuales como observábamos en los barridos de frecuencia (Figura 93), mejoraban el comportamiento del ligante frente a las deformaciones permanentes.

En la Tabla 32 encontramos los resultados relativos al comportamiento del ligante en términos de los índices Flow index (F) (el cual mide la capacidad del ligante de deformar frente a las cargas) y Recovery Capacity (RC) (como medio de cuantificar la elasticidad del ligante en lugar de

presentarlo en términos relativos como en el ensayo tradicional). Así, tal y como se mostraba en la Figura 113, la adición de los polímeros reducen la susceptibilidad de los ligantes a las cargas transmitidas por el tráfico. Esto queda de manifiesto por los menores valores de Flow Index (F) registrados, los cuales son incluso menores que los del betún modificado de referencia (PMB 45/80-65) y especialmente bajos para la combinación de PNFVU y LDPE.

Tabla 32. Valores de Flow Index (F), Recovery Capacity (RC) y L- Index de los distintos betunes ensayados.

Ligante	Flow Index, F (% / ciclo)	Recovery Capacity, RC (°)	L - Index
B50/70	0.876	7.6	6.5545
PMB 45/80-65	0.306	75.1	0.0812
B50/70 5% LDPE	0.279	14.9	1.0476
B50/70 5% GEO LLDPE	0.218	25.0	0.4669
B50/70 5% LDPE + 10% PNFVU	0.085	64.4	0.0409

Por otra parte, dentro de la capacidad de soportar las cargas, el índice Recovery Capacity (RC) indica la respuesta elástica del material (factor no considerado en otros tipos de análisis como los R-value, Crossover-Frequency o Glove-Rowe parameter) de modo que, a medida que este valor es mayor, también se incrementa la capacidad de resistir deformaciones plásticas y se mejora la resistencia a la fatiga. En este sentido, se precisan y confirman los resultados obtenidos en la aplicación de la metodología clásica de análisis del ensayo MSCR (Figura 112) con unos betunes modificados con polímeros que, si bien no alcanzan los niveles de recuperación elástica del betún modificado en refinería (PMB 45/80-65), si mejoran sustancialmente el comportamiento del betún base. Este incremento es mayor a medida que el polímero reciclado es más complejo (LLDPE Geomembrana) o es combinación de plastómeros y elastómeros (LDPE +PNFVU). En este último caso, acercándose a los niveles de recuperación del ligante modificado de referencia.

Finalmente, si consideramos de manera conjunta estos dos índices que reflejan el comportamiento del ligante frente a la acción del tráfico surge el parámetro L-Index. Cuanto menor sea el valor de este, mayor será la resistencia de la mezcla que incorpore un determinado betún frente a las cargas transmitidas por el paso de los vehículos.

De esta forma, se puede comprobar que la adición de polímeros reciclados mejora significativamente la resistencia mecánica del betún respecto a la del ligante base (B50/70) reduciendo el valor del L-Index un 84 % en el caso de la adición de polietileno de consumo

doméstico (LDPE) y hasta un 93 % en el caso del polietileno procedente de geomembrana (LLDPE GEO). Esta mejora es aún más importante en el caso de la combinación de plastómeros y caucho reciclados (LDPE + PNFVU) para la cual la resistencia no solo supera a la del betún base y las modificaciones con los distintos tipos de polietileno reciclado, sino que también mejora en un 91.2% la obtenida para el betún modificado en refinería (PMB 45/80-65).

Susceptibilidad a la temperatura

La Figura 114 muestra los cambios producidos para los parámetros $\Delta\epsilon_{nr}$ y RS_{15-30} como consecuencia del aumento de la temperatura de ensayo (de 45 a 70°C) y del envejecimiento de los ligantes (en relación al estado original de los betunes antes de los procesos de envejecimiento RTFOT y PAV, ambos ensayados a 45 °C).

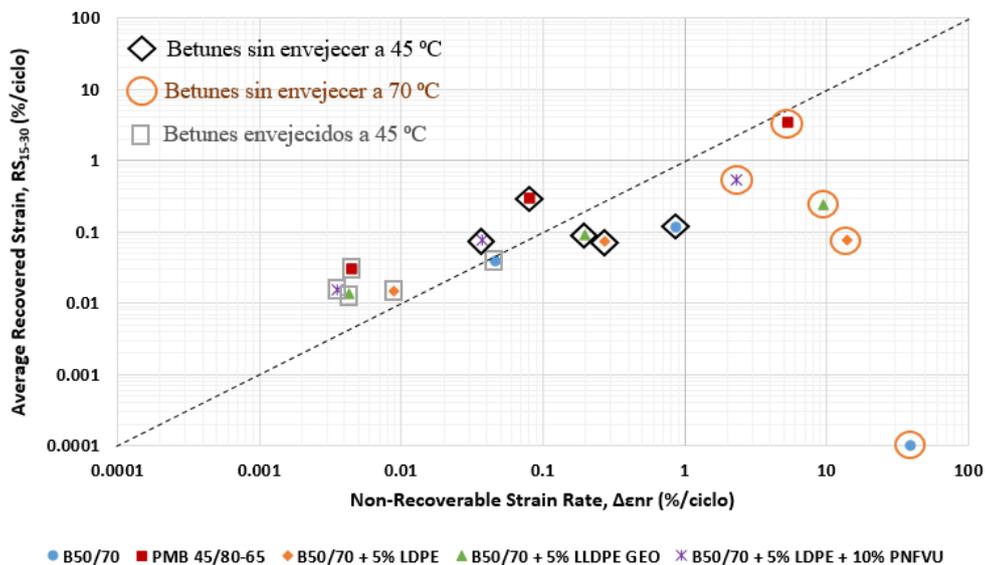


Figura 114. Evolución de los resultados obtenidos para el ensayo MSCR a 45 °C, 70 °C y 45 °C tras RTFOT +PAV empleando la metodología de análisis de Moreno-Navarro et al. (2019).

La primera consecuencia del aumento de la temperatura es el incremento del valor de $\Delta\epsilon_{nr}$ (parte de la deformación no recuperable) debido a la tendencia de los ligantes a volverse más blandos debido a la separación entre las cadenas moleculares causadas por la expansión térmica que permite un mayor movimiento de la red molecular y, con ello, una mayor afección por parte de las cargas cíclicas (Cheung & Cebon, 1997); Gaskin, 2013).

Por otra parte, la capacidad de recuperación de los betunes tras el aumento de temperatura se reduce, provocando que, dado que la susceptibilidad a las cargas aumenta con la temperatura (mayor F-index), todos los betunes se sitúen por debajo de la línea de puntos. Esto es indicativo

de que su capacidad de recuperar la deformación está en déficit con la cantidad de deformación permanente acumulada a temperaturas altas.

En este sentido, se aprecian mayores diferencias entre los distintos betunes modificados estudiados, los cuales presentan un peor comportamiento cuanto mayor sea la distancia con respecto a la línea de puntos. Se puede así comprobar como el betún base no tiene capacidad de recuperar deformación a temperaturas altas siendo su comportamiento significativamente mejorado tras la adición de LDPE de uso doméstico (se reduce $\Delta\epsilon_{nr}$ y se aumenta la capacidad de recuperación elástica) y, aún más, con el empleo de polietileno procedente de geomembrana (LLDPE GEO) y la combinación de LDPE y PNFVU. Este último es el que muestra un comportamiento más cercano al betún modificado de referencia (PMB 45/80-65) ya que, si bien no alcanza la recuperación de este, su tasa de deformación no recuperable ($\Delta\epsilon_{nr}$) es menor.

Estos resultados están en consonancias con lo mostrado por el índice de penetración (Tabla 28) y el parámetro S_{25-60} (Tabla 29) y confirman la teoría de que la variación de comportamiento observada para la combinación de LDPE + PNFVU en los diagramas de Black (Figura 88) se debe a la mayor movilización a altas temperaturas de la matriz de polímero con respecto al betún, mostrando así una mayor capacidad de recuperar las deformaciones que el resto de polímeros reciclados.

Susceptibilidad al envejecimiento

Al contrario de lo que sucedía con el aumento de temperatura, tras el envejecimiento los betunes tienden a volverse más rígidos y a tener un comportamiento más elástico y menos viscoso debido a los cambios en su composición química y estructura interna como el incremento en el contenido de asfaltenos y resinas (Tauste et al. 2018b) lo que conlleva una reducción en el valor de $\Delta\epsilon_{nr}$ para todos los betunes estudiados.

De igual modo, los valores de RS_{15-30} se reducen tras los procesos de envejecimiento, pero la capacidad de recuperación es mayor que la tasa de deformación no recuperable $\Delta\epsilon_{nr}$. El aumento de la rigidez ligada al envejecimiento de los ligantes es responsable de esta menor susceptibilidad del material a las cargas del tráfico.

No obstante, tal y como hemos visto en los análisis anteriores (Figura 104, Figura 105) una rigidez excesiva puede dar lugar a una mayor fragilidad de la mezcla y, en última instancia, a problemas de fisuración. En este sentido, este tipo de análisis permite no solo considerar los cambios producidos como consecuencia de la variación de los parámetros reológicos básicos de módulo de rigidez complejo (G^*) y ángulo de fase (δ) (tal y como se estudiaba en el caso de los análisis

de R-value, Crossover-Frequency y Glove-Rowe parameter) sino también tener en cuenta la capacidad de recuperación del material tras el envejecimiento.

Así, los ligantes más susceptibles a los problemas de fisuración serán aquellos que tras el envejecimiento se sitúen más cerca o incluso por debajo de la línea que delimita el predominio de la capacidad de recuperar las deformaciones frente a la acumulación de deformaciones permanentes. Con ello, vemos como el ligante base (B50/70) es el más susceptible a las deformaciones mientras que los betunes modificados reducen la cantidad de deformación acumulada y mantienen una recuperación elástica suficiente para no presentar problemas ligados a una excesiva rigidez.

Esto es especialmente reseñable en el caso de la combinación de polietileno y caucho reciclados (LDPE +PNFVU) siendo el más cercano al comportamiento del ligante modificado de referencia tras el proceso de envejecimiento, en consonancia con otros estudios como el de Yan et al. 2015 que indican una mayor degradación de los polímeros tipo SBS como los presentes en el PMB 45/80-65.

Susceptibilidad a las condiciones ambientales

En base a los resultados anteriores, queda claro que las condiciones ambientales afectan en mayor medida a las deformaciones permanentes acumuladas en la mezcla (principalmente dominadas por $\Delta\epsilon_{nr}$) que a la resistencia a la fatiga (más influida por la capacidad de recuperación del material, RS_{15-30}) (Moreno-Navarro et al., 2019). No obstante, este último debe ser considerado especialmente en el caso de los betunes envejecidos a fin de asegurar que la capacidad de recuperación se mantenga lo más alejada posible de la parte de la deformación permanente evitando problemas de fisuración por fatiga del material.

Para entender de manera más clara las variaciones de comportamiento de los distintos ligantes frente a la temperatura (susceptibilidad térmica) y al paso del tiempo (susceptibilidad al envejecimiento), en la Figura 115 se encuentran representados los valores de T-Index frente a los de A-Index, ambos índices obtenidos a partir de las variaciones representadas en la Figura 114 para indicar la sensibilidad a dichos fenómenos.

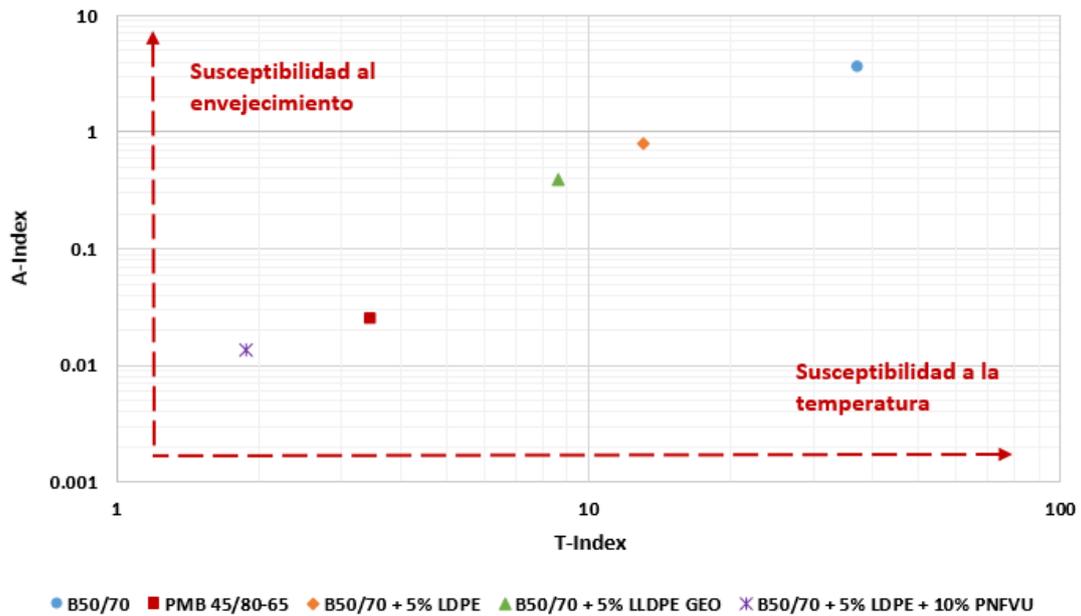


Figura 115. Representación de la susceptibilidad de los distintos ligantes debido a las condiciones ambientales: temperatura (T-Index) y envejecimiento (A-Index).

En dicha gráfica cuanto más cerca del origen se sitúan los ligantes menor es la susceptibilidad a las condiciones ambientales. De este modo, el ligante base (B50/70) es el más afectado por los cambios térmicos, mientras que los ligantes modificados con polietileno (LDPE y LLDPE GEO) se sitúan en un punto intermedio entre este y el ligante modificado en refinería (PMB 45/80-65).

La consideración en este análisis, no solo de la capacidad portante del material (a partir de su módulo de rigidez complejo G^*) sino también de su recuperación elástica, permite precisar la diferencia entre los dos tipos de polietileno (LDPE y LLDPE GEO). Esto es posible debido a la presencia de fibras en el residuo de geomembrana las cuales, en este caso, no solo afectan a la rigidez del material sino también a la capacidad de recuperar del mismo. De este modo, la diferencia en la susceptibilidad térmica es más marcada y la variación con respecto al envejecimiento queda matizada, mostrando incluso el residuo de geomembrana un mejor comportamiento al no considerar exclusivamente la rigidez del material. Esto ya se intuía a partir los resultados del Crossover-Frequency y R-Value (Figura 104) para los cuales tras el envejecimiento la diferencia de comportamiento obedecía más a los cambios de R-value (más ligado a la rigidez) que a la diferencia de Crossover-Frequency, y confirma el efecto de las fibras observado en el análisis de la microestructura (AFM) tras el envejecimiento.

En relación al betón modificado con la combinación de plastómeros y elastómeros reciclados (LDPE + PNFVU), este es el que menor susceptibilidad tiene a los cambios de temperatura y a la acción de los procesos oxidativos del envejecimiento, con el aumento de la durabilidad que ello conlleva. En este sentido, la consideración de la recuperación elástica en este análisis confirma

una susceptibilidad térmica no solo similar a la del betún modificado en refinería, sino que supera a la de este.

Comportamiento global del ligante durante su vida útil

Para terminar con este análisis, en la Figura 116 se encuentran representados la susceptibilidad de los distintos ligantes al paso del tráfico a través del L-Index frente al efecto conjunto de la susceptibilidad térmica y del envejecimiento a través del índice de susceptibilidad a la condiciones ambientales (AM-Index). De esta forma, es posible evaluar de manera simple el comportamiento general de los ligantes durante toda su vida útil.

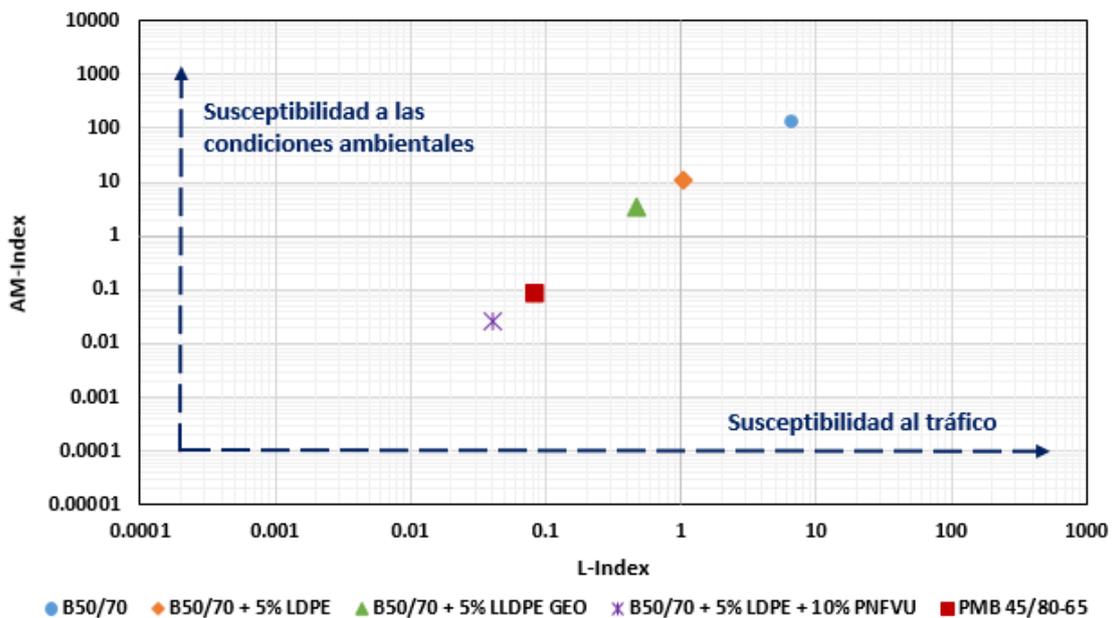


Figura 116. Representación de la susceptibilidad de los distintos ligantes al tráfico (L-index) y a las condiciones ambientales (AM-Index) clasificando por tipo de clima y tráfico.

A igualdad de tráfico, la durabilidad de las infraestructuras que incorporen los polímeros reciclados será mucho mayor. En este sentido, la combinación de estos con el caucho reciclado permite alcanzar niveles de comportamiento propios de betunes modificados convencionales empleados en mezclas de altas prestaciones siendo su susceptibilidad ambiental (cambios térmicos y envejecimiento) menor, lo que podría favorecer su utilización en climas más extremos. De manera opuesta, si consideramos unas condiciones ambientales análogas, el empleo de polímeros reciclados podría dar lugar a un material más duradero con respecto a la mezcla convencional (en el caso de la modificación con distintos tipos de polietileno), o con respecto al betún modificado de referencia (en el caso de la combinación de polietileno y

caucho). Esto se traduciría en una menor necesidad de mantenimiento y sustitución de las mezclas que los incorporan.

Observando los resultados, queda claro que el empleo de polietileno reciclado (LDPE y LLDPE GEO) logra mejorar tanto la susceptibilidad con respecto a las condiciones ambientales como al paso de los vehículos en relación al betún base (B50/70). Por otro lado, el empleo de una combinación de plastómeros y elastómeros reciclados (LDPE + PNFVU) es suficiente para alcanzar un grado de desempeño similar (e incluso superior en algunos aspectos) al del betún modificado de referencia (PMB 45/80-65).

5.2 Impacto del polímero reciclado a distintas escalas: ligante, mortero y mezcla bituminosa

Tras caracterizar la interacción entre el betún y los distintos polímeros reciclados durante toda su vida útil, en esta sección se muestran los resultados relativos a la evaluación del modo en el que las propiedades previamente observadas y descritas se trasladan primero, a un nivel intermedio entre el ligante y la mezcla bituminosa como es el mortero y, después a la mezcla bituminosa como tal.

5.2.1 Aplicación de ligantes modificados con polímeros reciclados a morteros bituminosos. Análisis DMA

Para la evaluación a nivel de mortero, se estudiaron distintos morteros empleando los ligantes modificados con polímeros reciclados (5% LDPE, 5% LLDPE GEO y 5% LDPE + 10% PNFVU) y los betunes de referencia (B 50/70 y PMB 45/80-65). En la siguiente tabla se encuentran recogidos los valores de densidad de los distintos morteros:

Tabla 33. Densidad aparente de los distintos morteros.

Ligante	Densidad aparente (Mg/m ³)
B50/70	2.493
PMB 45/80-65	2.395
B50/70 5% LLDPE	2.463
B50/70 5% GEO LLDPE	2.395
B50/70 5% LDPE + 10% PNFVU	2.408

Tal y como se refería en la metodología, cada tipología de mortero fue sometida a un ensayo de barrido de amplitudes para establecer hasta qué carga (deformación) las probetas aguantaban

sin romperse delimitando así el rango de cargas que permite estudiar el comportamiento viscoelástico lineal del material. Para este se obtendrían las propiedades básicas del mismo: módulo de rigidez complejo y ángulo de fase.

De esta forma y de acuerdo a lo observado en los barridos de amplitudes, se estableció para todas las tipologías de ensayo una precarga de 10 N. Esta es suficiente para asegurar el contacto entre actuador y probeta durante todo el ensayo dinámico pero lo bastante baja para no suponer por sí misma la rotura de la probeta. Una vez definido esto, se sometió a las distintas probetas al ensayo de fatiga en tres puntos, para el cual, en virtud de nuevo de los resultados de barrido de amplitudes, se establecieron tres niveles de carga a partir de los cuales determinar las leyes de fatiga: 1 N, 2.5 N y 4 N.

5.2.1.1 Evaluación de la rigidez y comportamiento viscoelástico del material

De este modo y en primer lugar, en la Figura 117 se muestran los valores promedio de módulo de rigidez de las diferentes tipologías de mortero para los distintos niveles de carga, tanto en condiciones de seco como tras ser sometidas al acondicionamiento para comprobar la susceptibilidad del material a la acción del agua.

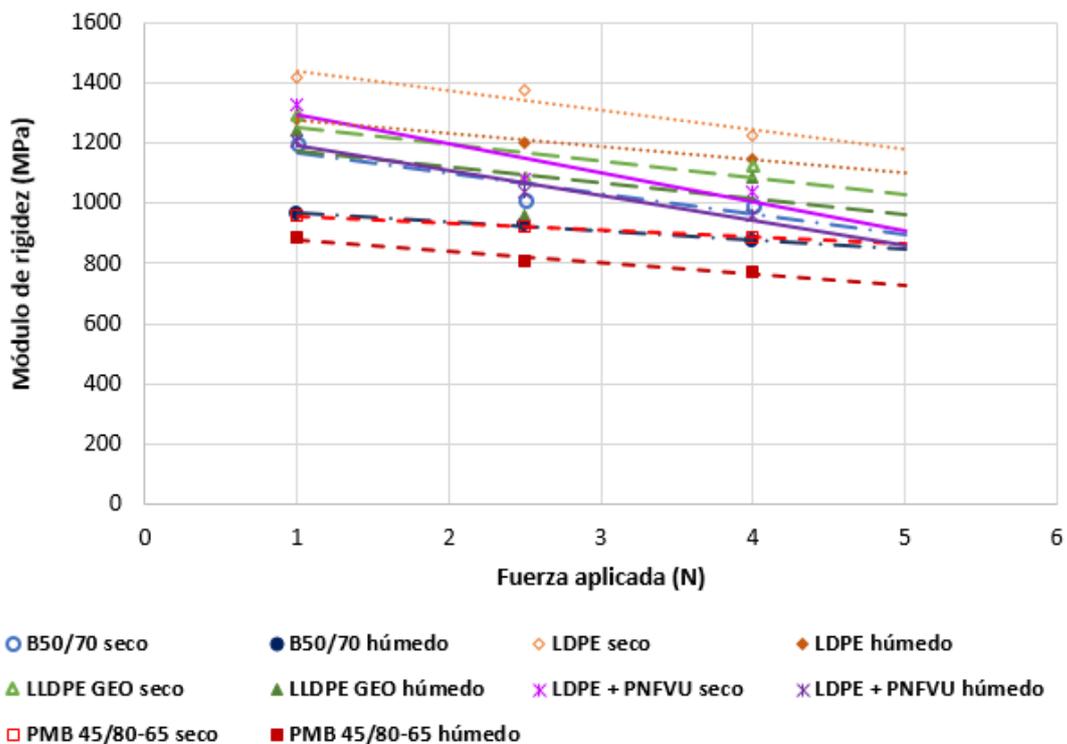


Figura 117. Evolución de la rigidez promedio de los distintos morteros a las distintas cargas.

En ella, se pueden observar algunas diferencias con respecto a los valores de módulo obtenidos en los barridos de frecuencia de los distintos ligantes cuando analizábamos esta misma frecuencia de ensayo (5 Hz) a través de las isocronas a distintas temperaturas (Figura 93). De este modo, el betún modificado en refinería (PMB 45/80-65) muestra tanto en condiciones de seco y de húmedo una rigidez menor que la del betún de penetración base (B 50/70). Por otro lado, aunque la adición de los distintos polímeros reciclados sigue suponiendo un aumento de la rigidez, dicho aumento es menos marcado. Además, la presencia de materiales adicionales al polietileno modifica en cierta medida la evolución del módulo con la carga.

Así, por ejemplo, la adición del caucho causa que a medida que la carga crece, la reducción del módulo sea más pronunciada que en el caso de las dos tipologías de polietileno estudiadas (LDPE y LLDPE GEO) pasando de ser similar a la del residuo de geomembrana a cargas bajas, a presentar valores cercanos a los betunes de referencia a las más altas. Esto puede indicar que, mientras a cargas bajas puede predominar el polietileno, a medida que estas aumentan crece la influencia del caucho limitando en cierta medida la rigidez final.

Finalmente, cuando comparamos los dos tipos de polietileno reciclado incorporados vemos que, en este caso el polietileno procedente de geomembrana (LLDPE GEO), este presenta unos valores de módulo algo inferiores. De este modo, mientras que la presencia de fibras en este material contribuía a aumentar la rigidez desde el punto de vista del ligante, en este caso, muchas de ellas se emplean en la interacción con el fíller y los áridos de manera que la diferencia de entre las dos tipologías de polietileno queda más marcada presentando el polietileno lineal (LLDPE GEO) una rigidez ligeramente menor. No obstante, será necesario comprobar a nivel de mezcla completa la interacción de las fibras con el conjunto de los áridos y cómo esta afecta a la densificación de la mezcla para confirmar de manera definitiva la influencia de las fibras en la rigidez final de esta.

Entrando en el detalle del máximo nivel de carga, en la Figura 118 se muestran los valores promedio de módulo de rigidez del grupo seco y húmedo de las distintas tipologías de mortero así como el porcentaje de módulo conservado.

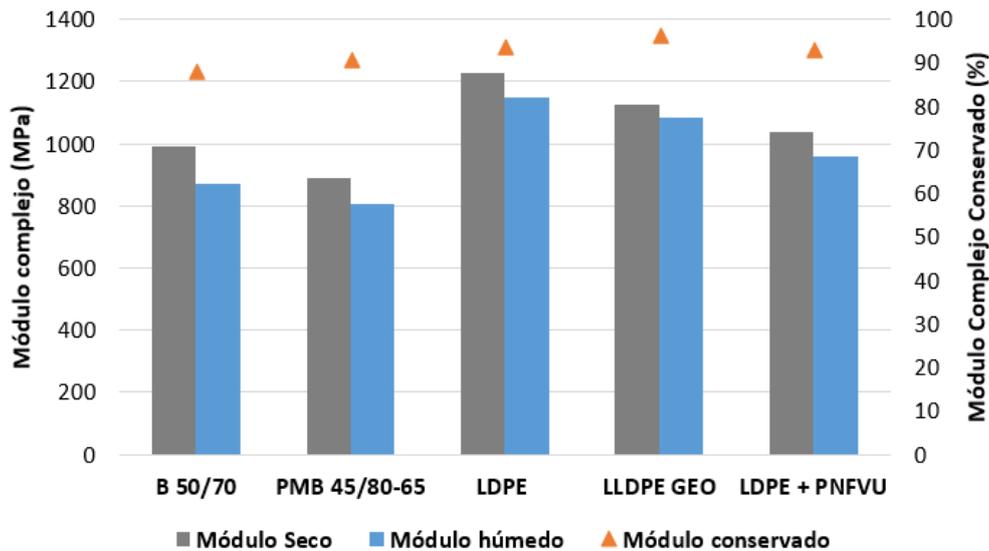


Figura 118. Valores promedio de módulo y módulo conservado para el máximo nivel de carga.

De nuevo aquí se puede apreciar de manera más clara cómo la adición del polietileno conlleva el incremento del valor de rigidez de los morteros y con ello su capacidad portante. La combinación de este material con el caucho mitiga en cierta medida la rigidez del material hasta valores más cercanos a los betunes de referencia.

En relación a la susceptibilidad a la humedad, todos los morteros reducen el valor de módulo de rigidez tras el acondicionamiento, presumiblemente por el deterioro en la adhesividad entre áridos y betún debido a la acción del agua. En este sentido, es necesario destacar que pese a que todos los morteros conservan una elevada proporción de su módulo (> 85%), en el caso de los betunes modificados con polímeros reciclados, estos alcanzan los mayores porcentajes de módulo conservado: alrededor del 93% para los betunes modificados con LDPE y la combinación de LDPE y PNFVU y por encima del 96% en el caso del polietileno de geomembrana (LLDPE GEO). Esto es indicativo de que la interacción entre las fibras y los áridos logra disminuir la susceptibilidad al agua del material mejorando su comportamiento si se compara con el resto de polímeros reciclados y, sobre todo, frente a los betunes de referencia.

Por otra parte, si analizamos el ángulo de fase de las distintas tipologías de mortero, en la Figura 119 se puede apreciar, como al igual que en el caso de la reología, la adición de polímeros contribuye a la reducción del ángulo de fase del mortero y, por tanto, a un comportamiento más elástico del mismo. Serán el betún modificado de referencia (PMB 45/80-65) y la combinación de polietileno con caucho los que presenten menor valores de ángulo de fase.

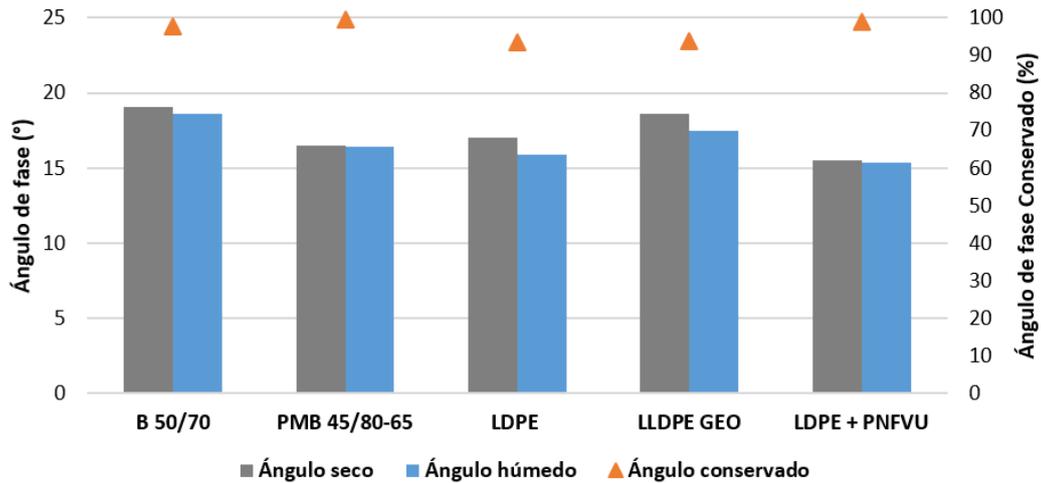


Figura 119. Valores promedio de ángulo de fase y ángulo conservado para el máximo nivel de carga.

En relación al efecto del agua, este parámetro parece ser menos sensible que el módulo obteniendo en todos los casos valores de ángulo conservado muy elevados.

5.2.1.2 Evaluación de la resistencia a fatiga del material

Entrando a analizar la fatiga del material, en la Figura 120 se muestran las leyes de fatiga de los distintos morteros ensayados. De este modo, se puede comprobar la influencia que tienen los distintos ligantes y la interacción de estos a nivel de mástico y con la fracción más fina de los áridos, en la vida de fatiga a una temperatura intermedia como la que puede darse habitualmente durante la vida de servicio de las mezclas.

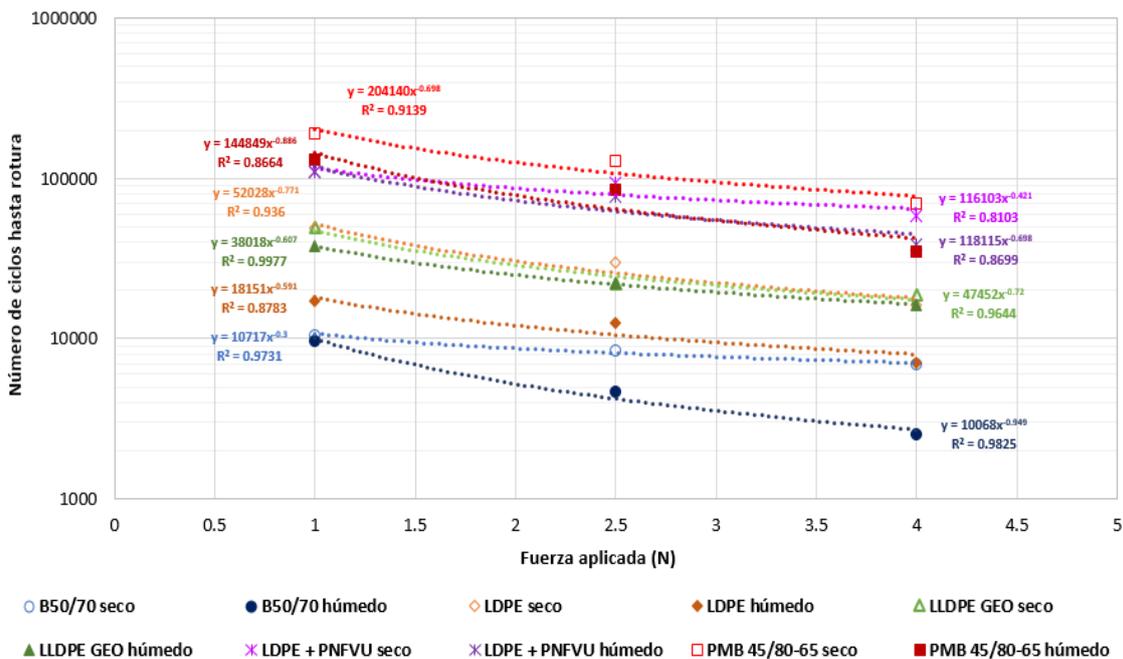


Figura 120. Leyes de fatiga de los distintos morteros ensayados.

Así se comprueba como el betún modificado de referencia (PMB 45/80-65) es el que muestra una mayor vida de fatiga para todos los niveles de carga. No obstante, a medida que crece la carga o tras la acción del agua, el ligante modificado con la combinación de polietileno y caucho (LDPE + PNFVU) es capaz de mostrar una resistencia similar, demostrando que en términos de fatiga este material puede alcanzar unas prestaciones análogas.

Por otra parte, también se demuestra cómo la simple adición de polietileno (LDPE) ya contribuye a mejorar de manera significativa la resistencia a la fatiga del material cuando se compara con el betún base (B50/70) mejorando la vida de esta entre un 173% y un 366 % en función de la carga aplicada. De este modo, se confirma la mayor resistencia a fatiga mostrada por este tipo de ligantes modificados en otros estudios (Nuñez et al. 2014; García-Travé et al., 2016; Bala et al., 2016) y se da lugar a un material más duradero y con menor riesgo a presentar patologías como las fisuras que den lugar a la necesidad de tareas de mantenimiento.

Esta mejora es aún mayor en el caso del polietileno procedente de geomembrana (LLDPE GEO) donde la presencia de fibras hace que la resistencia alcanzada sea superior a la del polietileno procedente de uso doméstico, manteniendo además para todos los niveles de carga una mayor resistencia conservada a la acción del agua (confirmando lo observado en la variación del módulo de rigidez).



Figura 121. Aspecto de las muestras de mortero de los distintos ligantes tras su ensayo a fatiga.

Centrándonos en el mayor nivel de carga, en la Figura 142, queda de manifiesto la similitud entre el betún modificado de referencia (PMB 45/80-65) y el betún modificado con LDPE + PNFU. De igual modo, queda claro el aumento de la vida de fatiga obtenido tras la adición del polietileno con respecto al betún base (B50/70) y cómo, tanto en el caso de la combinación de este con el caucho como de manera significativa para el residuo de geomembrana, la integración entre áridos y ligante mejora sustancialmente.

Esto se refleja en el incremento de la resistencia a la fatiga tras el acondicionamiento en agua donde se alcanzan valores superiores incluso a los del betún modificado en refinería (PMB

45/80-65), demostrando el efecto beneficioso de las fibras y el caucho a la hora de extender la vida de fatiga de las mezclas que los incorporen en zonas de elevada humedad.

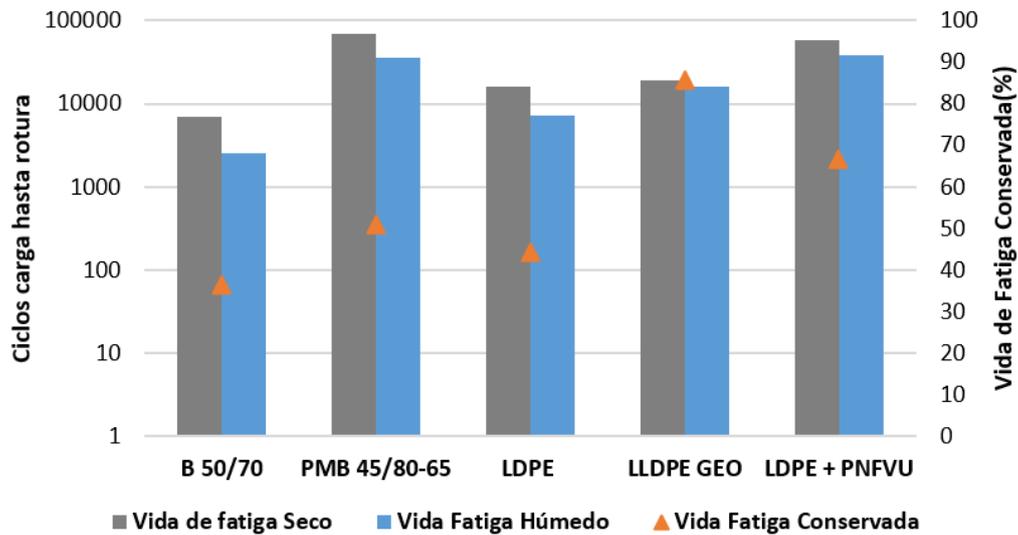


Figura 122. Ciclos de carga hasta rotura y vida de fatiga conservada para el máximo nivel de carga.

5.2.2 Aplicación de ligantes modificados con polímeros reciclados a mezclas bituminosas

Una vez analizado el efecto de los ligantes modificados con polímeros reciclados tanto a nivel de betún (estudiando la interacción de los polímeros con este) como a nivel de mortero, en este apartado se analiza la potencial mejora de propiedades obtenidas para la mezcla en su conjunto. Para ello, se analizó el uso de un tipo de mezcla de altas prestaciones que permitiese evaluar el mayor número de mejoras mecánicas posible.

En este sentido, el empleo de mezclas de elevadas prestaciones como las de tipo SMA es de gran interés, pero requieren del empleo de ligantes modificados y/o de fibras para obtener una respuesta y durabilidad óptimas. Por ello, en este apartado se explora el uso de los ligantes modificados con polímeros reciclados previamente estudiados en comparación con soluciones estándar presentes en el mercado como son el uso del ligante base B50/70, el empleo del ligante modificado con polímeros tipo SBS (PMB 45/80-65) o el uso conjunto de este último con fibras acrílicas en un contenido del 0.3% sobre el peso de mezcla.

5.2.2.1 Sensibilidad al agua de las mezclas

Como primera propiedad a evaluar, en la Figura 123 se muestran los resultados del ensayo de sensibilidad al agua. En ella se puede observar cómo los valores de tracción indirecta de las mezclas que incorporan los distintos polímeros reciclado tienden a ser iguales o superiores a los

de las mezclas fabricadas con los betunes de referencia. Distinguiendo entre tipologías, la presencia del polietileno de baja densidad (LDPE), incrementa los valores de tracción tanto en condiciones secas como en presencia del agua. Esto es apreciable si se comparan la mezcla con LDPE y la combinación de este polímero con caucho (LDPE + PNFVU) con la mezcla fabricada con el betún modificado de referencia (PMB 45/80-65).

En cuanto a la resistencia conservada tras la acción de la humedad, ambas mezclas pese a tener valores de tracción indirecta en condiciones secas del orden de la mezcla fabricada con el betún base (B50/70) sí mejoran significativamente la resistencia a la acción de la humedad frente a esta obteniendo cumpliendo con lo exigido en normativas como la española (ITSR > 90% (PG-3; Dirección General de Carreteras. Ministerio de Fomento, 2015).

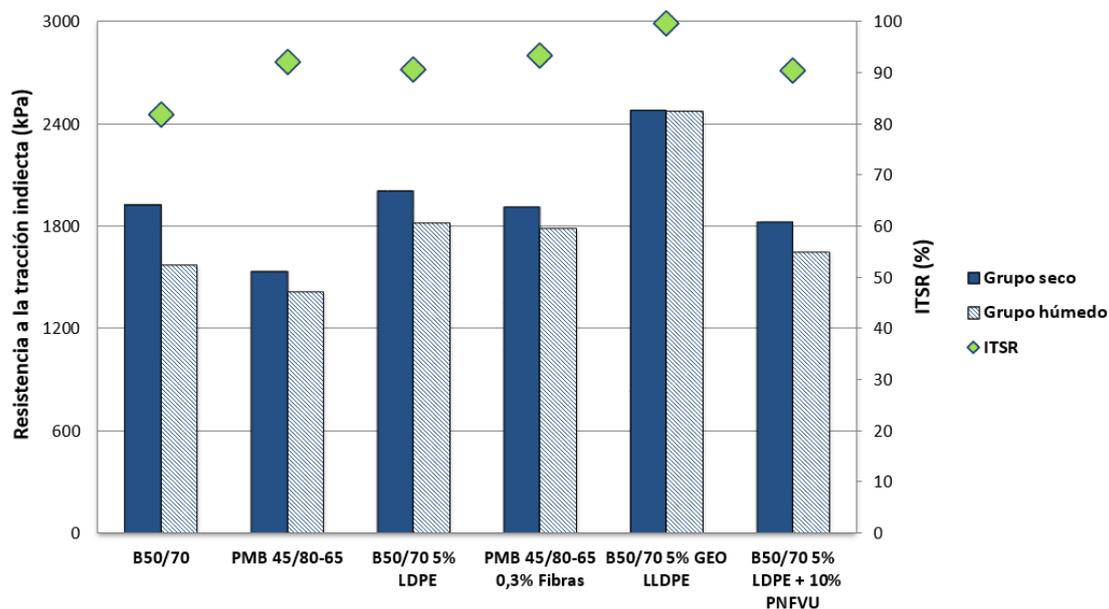


Figura 123. Resultados de resistencia a tracción indirecta y sensibilidad al agua de las distintas mezclas estudiadas.

Atendiendo a las mezclas que incorporan fibras en su composición, el empleo de polietileno procedente de geomembrana (LLDPE GEO) incrementa notablemente la resistencia a la tracción indirecta de las mezclas (ITSr = 99.6 %) si se compara con la mezcla que emplea el betún modificado en refinería (PMB 45/80-65 +0.3% Fibras) mejorando además la resistencia a la humedad, la cual alcanza un valor mucho mayor que el obtenido con la otra mezcla fabricada con polietileno reciclado de uso doméstico (LDPE) para un contenido de huecos similar.

Con todo ello, se puede afirmar que el empleo de polímeros reciclados en las mezclas, contribuye a mejorar notablemente la resistencia a la acción del agua respecto de la mezcla convencional (B50/70), con valores similares a los de las mezclas fabricadas con betunes

modificados en refinería e incluso superando las prestaciones de esta última tras la adición de fibras (PMB 45/80-65 + 0.3 Fibras) para el caso de la mezcla que incorpora el polietileno lineal de baja densidad procedente de geomembrana (LLDPE GEO).

Estos resultados están en consonancia con lo encontrado por otros autores, los cuales abogan por un aumento en la resistencia a tracción de las mezclas cuando se emplean distintos modificadores, especialmente para aquellos que introducen fibras en su composición debido a la red interna creada por las mismas en la mezcla (Sengul, Oruc, Iskender, & Aksoy, 2013); Moreno-Navarro et al., 2014).

Junto con esto, hay que señalar que todas las probetas presentaron una fractura lineal donde la rotura se producía por los áridos y el ligante cubre perfectamente los mismos, señalando el mantenimiento de la adhesividad entre el betún, los polímeros y los áridos que explican la buena resistencia encontrada frente a la acción del agua. Esto se mantiene incluso en el caso más desfavorable, el grupo húmedo de las mezclas que incorporan el mayor contenido de polímero reciclado (LDPE + PNFVU):



Figura 124. Aspecto de la rotura para el grupo húmedo de las mezclas combinación de LDPE + PNFVU.

5.2.2.2 Evaluación de la rigidez de las mezclas

Entrando a analizar los motivos por los cuales la adición de polímeros reciclados mejora la resistencia de las mezclas que los incorporan, otro factor importante a tener en cuenta es la rigidez de estas. Como ya se ha visto en etapas anteriores, la adición de estos materiales incrementa la rigidez del ligante, pero es necesario ver cómo este aumento se refleja en la capacidad portante de las mezclas y de qué manera esto repercute en la mejora del comportamiento mecánico de las infraestructuras que las incorporan.

De esta forma, en la Figura 125 se muestran los resultados de módulo de rigidez de las mezclas estudiadas a distintas temperaturas. Se puede comprobar cómo, independientemente de la temperatura, la adición de plastómeros en forma de polietileno aumenta considerablemente la rigidez con respecto a las mezclas de referencia (B50/70 y PMB 45/80-65). De este modo se sigue la tendencia mostrada cuando se analizaba la reología de los betunes modificados y de los

morteros, y se demuestra una mayor capacidad para distribuir las tensiones transmitidas por el tráfico.

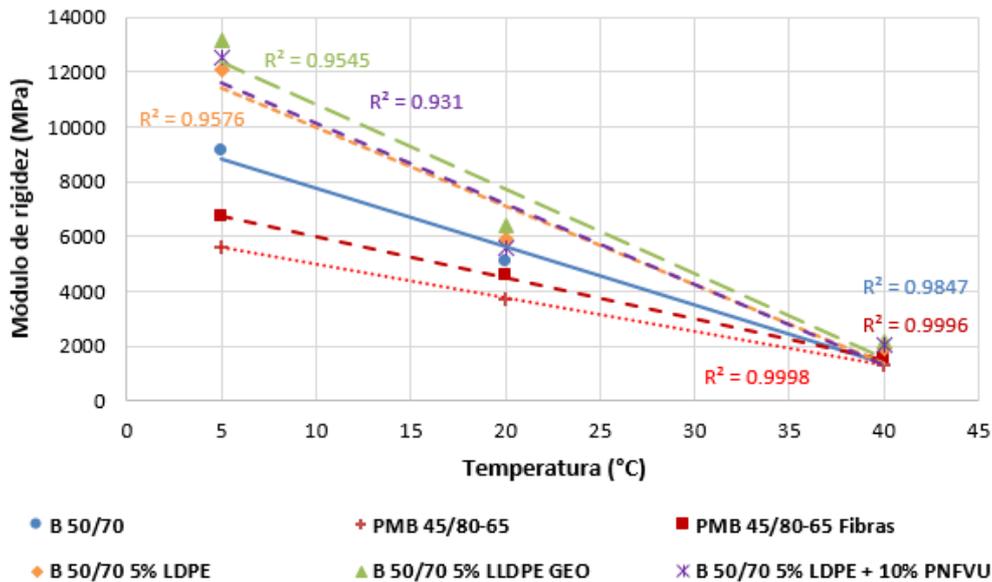


Figura 125. Resultados de módulo de rigidez a distinta temperatura de las distintas mezclas estudiadas.

De igual modo, tanto en el caso del betón modificado en refinería (PMB 45/80-65) como en el caso del betón modificado con polietileno reciclado de consumo doméstico (LDPE), la adición de fibras (en el caso del polietileno a través del residuo de geomembrana, LLDPE GEO) aumenta considerablemente la rigidez de la mezcla y, con ello, su capacidad de soportar las cargas del tráfico tal y como se ha constatado en otros estudios (Huang and White 1996; Xu et al. 2010). En cuanto a la mezcla que combina elastómeros y plastómeros de origen reciclado (LDPE + PNFVU) su rigidez, aunque superior a las mezclas de referencia es, en términos generales, la más baja de entre los betunes modificados con polímeros reciclados.

5.2.2.3 Evaluación de la resistencia a las deformaciones permanentes de las mezclas

Otro de los principales problemas vinculados a la durabilidad de las mezclas es su resistencia a las deformaciones permanentes a altas temperaturas la cual, en caso de no ser suficiente, dará lugar a problemas como las roderas. Para evaluar dicha problemática, en la Figura 126 se muestra, en primer lugar, la evolución de la profundidad de la rodera para las distintas mezclas estudiadas. En ella queda de manifiesto como el empleo de betunes modificados en refinería con y sin la presencia de fibras son capaces de mejorar significativamente el comportamiento de las mezclas.

Entrando a valorar las mezclas fabricadas con los distintos polímeros reciclados, el empleo de polietileno de baja densidad procedente del uso doméstico (LDPE) consigue mejorar la resistencia a la deformación al final de los 10000 ciclos de carga en un 19.8 %, un valor algo menor pero cercano al 25.1 % que se alcanza al emplear el betún modificado en refinería (PMB 45/80-65) confirmando la mejora aportada por este material referida en otros trabajos (Yan et al. 2015).

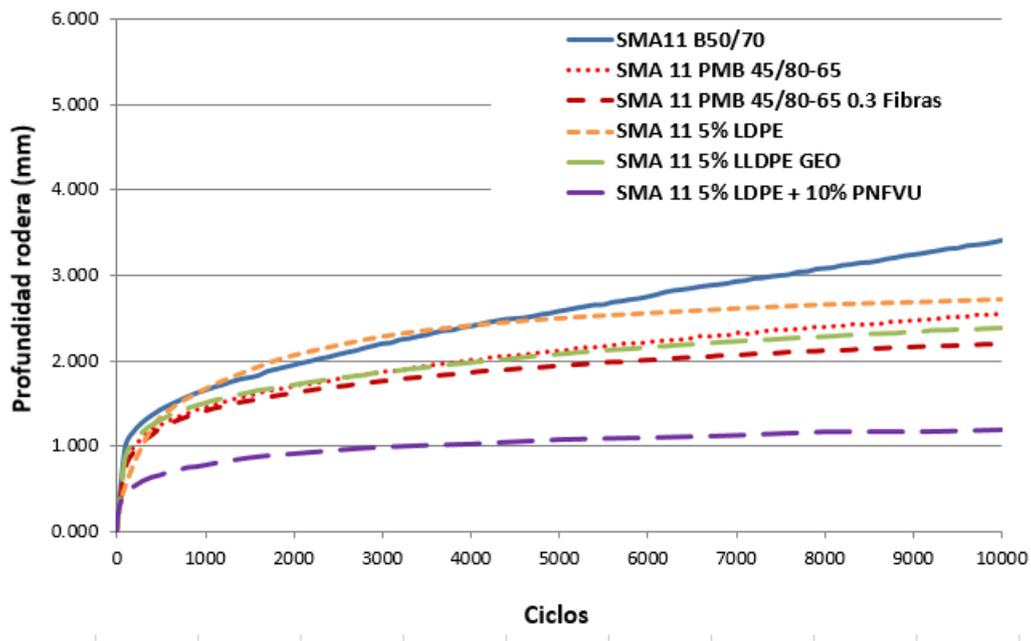


Figura 126. Evolución de la profundidad de rodera con los ciclos del ensayo de rodadura para las distintas mezclas.

De manera similar, tal y como se refiere en otros estudios (Xu, Chen, & Prozzi, 2010); Moreno-Navarro et al. 2014), el empleo de fibras da lugar a una mejora sustancial del comportamiento de las mezclas frente a este fenómeno. De este modo, la presencia de estas en el polietileno procedente de geomembrana y la mayor capacidad portante de esta mezcla (Figura 125), aporta unas reducciones de rodera mayores a las del otro tipo de polietileno (LDPE) alcanzando valores que, si bien no llegan al 35.2 % de reducción obtenido para el uso conjunto del betún modificado en refinería al que se añaden fibras (PMB 45/80-65 + 0.3% Fibras), sí alcanzan un importante 29.8 % de reducción de rodera al comparar con el betún B 50/70.

En ambos casos, y pese a no alcanzar la resistencia de las mezclas fabricadas con los betunes modificados de referencia (al no contar con la componente elástica que los elastómeros presentes en estos aportan), ambos polímeros reciclados prueban ser capaces de mejorar significativamente el comportamiento de la mezcla frente a las deformaciones permanentes,

confirmando lo observado desde el análisis a nivel de ligante mediante la evaluación del parámetro L-index (Tabla 32).

Mención aparte merece el comportamiento de la mezcla que incorpora conjuntamente el polietileno de baja densidad y el polvo de neumático (LDPE + PNFVU). La presencia de estos dos polímeros que, por separado, son capaces de mejorar el comportamiento de la mezcla frente a las deformaciones plásticas, muestra ser realmente efectivo al emplearlos de manera combinada, confirmando los resultados obtenidos durante la caracterización del ligante (Figura 112, Figura 114) y los descritos en trabajos de otros autores (Yan et al. 2015). De esta forma, se confirma cómo las mejoras de las propiedades mecánicas no están solo relacionadas con la mayor rigidez aportada por el polietileno, sino que el aumento de la recuperación elástica aportada por el elastómero (caucho en forma de PNFVU) contribuye enormemente a la mejora estructural de la mezcla bituminosa. Esto está en consonancia con los resultados de resistencia a las deformaciones permanentes y resistencia al paso del tráfico (Figura 45, Tabla 32). Así, la mezcla que incorpora LLDPE + PNFVU reduce la profundidad de rodera en un 65.1 % con respecto al betún base (B50/70) y en un 46.1 % con respecto a la combinación de fibras y el betún modificado en refinería (PMB 45/80-65).

Algo similar ocurre al analizar la pendiente de deformación de las distintas mezclas estudiadas (Figura 127). En ella podemos ver cómo, si bien la profundidad de rodera alcanzada por el betún modificado con polietileno de baja densidad (LDPE) era ligeramente superior a la del betún modificado de referencia (PMB 45/80-65), la pendiente de deformación obtenida por este reduce el valor del betún modificado.

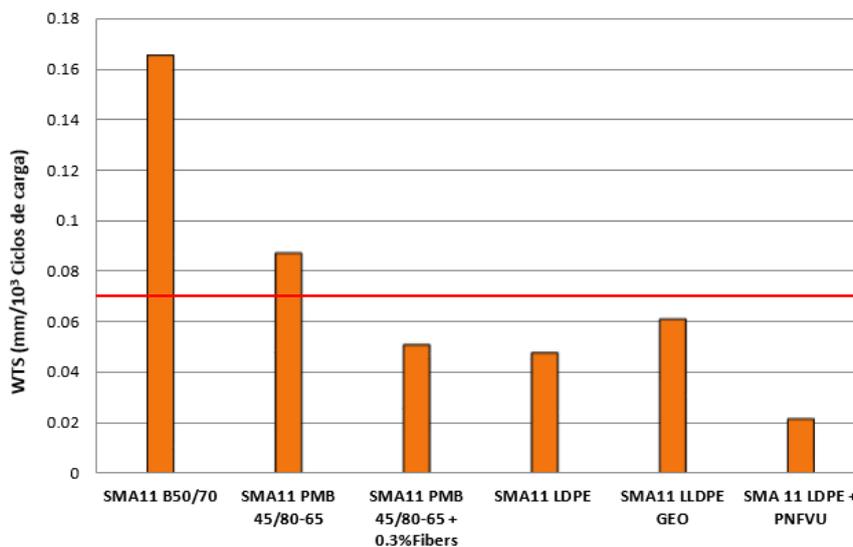


Figura 127. Pendiente media de la deformación en pista WTS aire para las distintas mezclas.

Esto hace que, al igual que para el resto de mezclas que incorporan polímeros reciclados, todas ellas se sitúen por debajo del valor de 0.07 mm/10³ ciclos de carga establecido en normativas como la española (PG-3; Dirección General de Carreteras. Ministerio de Fomento, 2015) para capas de rodadura. De nuevo aquí, la combinación del polietileno de uso doméstico y el polvo de neumático al final de su vida útil (LDPE + PNFVU) demuestra ser el material con mayor resistencia.

5.2.2.4 Evaluación de la influencia de la temperatura en la resistencia a la fisuración

Junto a las propiedades mecánicas anteriores, otro fenómeno al que una mezcla bituminosa debe dar adecuada respuesta es la fisuración por fatiga, siendo necesario evaluar el modo en el que las distintas mezclas estudiadas se adaptan a distintos escenarios térmicos. Esto es especialmente importante si consideramos el aumento de rigidez obtenido mediante la adición de los distintos polímeros como un riesgo para la resistencia a la fisuración de las mezclas a bajas temperaturas.

Por ello, en la Figura 128 se muestran los valores promedio de tres probetas en relación a la resistencia de las mezclas de referencia: SMA 11 B 50/70 y SMA 11 PMB 45/80-65 + 0.3% Fibras (por ser la mezcla modificada de mejores prestaciones) frente a las soluciones que incorporan los distintos polímeros reciclados (LDPE, LLDPE y LDPE + PNFVU) para un nivel de carga análogo de 0.4 kN.

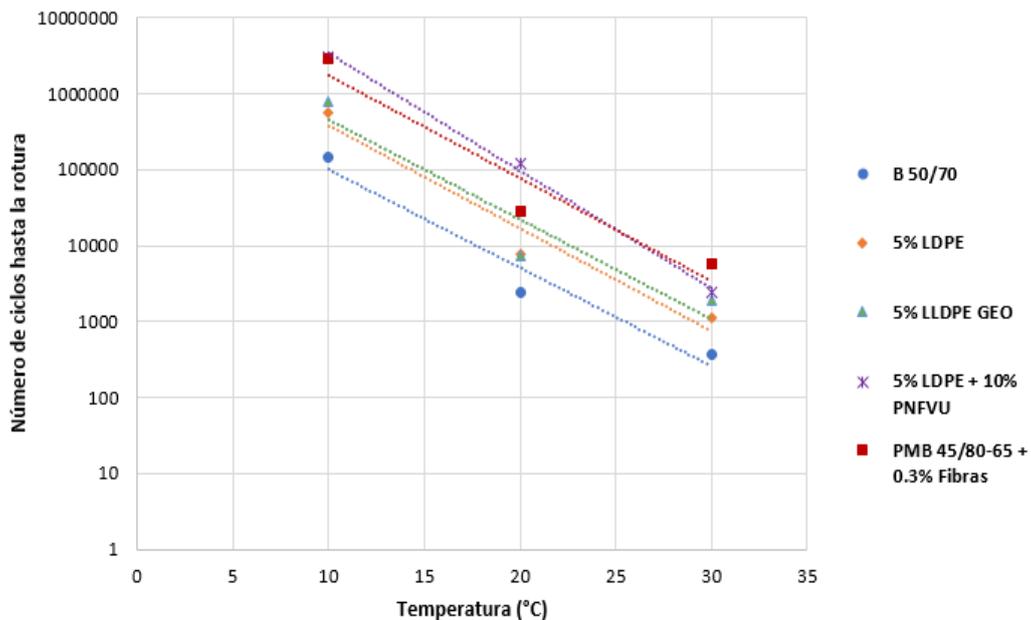


Figura 128. Evolución de la resistencia promedio a la fisuración de las distintas mezclas para distintas temperaturas.

Es posible observar cómo para todas las temperaturas estudiadas la adición de polímeros reciclados es capaz de mejorar sustancialmente la resistencia a la fisuración de la mezcla con respecto a la mezcla de referencia. Esta mejora se produce incluso para las temperaturas más bajas (10 °C), mostrando que incluso con el aumento de rigidez, las mezclas modificadas con polímeros reciclados son capaces de obtener una durabilidad mayor incluso en climas fríos, confirmando lo observado en otros estudios como el de Yan et al. 2015. Esto sumado a la mayor resistencia a deformaciones permanentes a altas temperaturas, da lugar a mezclas con una vida de servicio más amplia y menor necesidad de actuaciones de mantenimiento.

A tenor de estos resultados, se puede también concluir que la presencia de fibras en el polietileno procedente de geomembrana (LLDPE GEO) se pone más de manifiesto a medida que la temperatura de servicio es mayor, obteniendo resistencias más elevadas con respecto al polietileno de uso doméstico para la temperatura de ensayo más alta.

Por otro lado, una vez más el uso combinado del PNFVU y el LDPE reciclados muestran los mejores resultados de resistencia a la fisuración alcanzando valores similares a los de la mezcla fabricada con el betún modificado de referencia y fibras en todo el rango de temperaturas. La presencia del caucho como elastómero en el material hace que la resistencia sea incluso superior a la de la mezcla de referencia (PMB 45/80-65 + Fibras) a las temperaturas más bajas, manteniéndose por encima de esta hasta que la temperatura supera los 25- 30 °C.

Por otra parte, en la Figura 129 se muestra la evolución de la deformación horizontal inicial producida en las distintas mezclas cuando se varía la temperatura de ensayo. De este modo, se puede apreciar cómo la presencia de fibras en el polímero de geomembrana hace que, incluso para las temperaturas más bajas (donde la rigidez del material es mayor y las diferencias entre tipologías menos marcadas) la deformación inicial de la mezcla se reduzca de manera considerable.

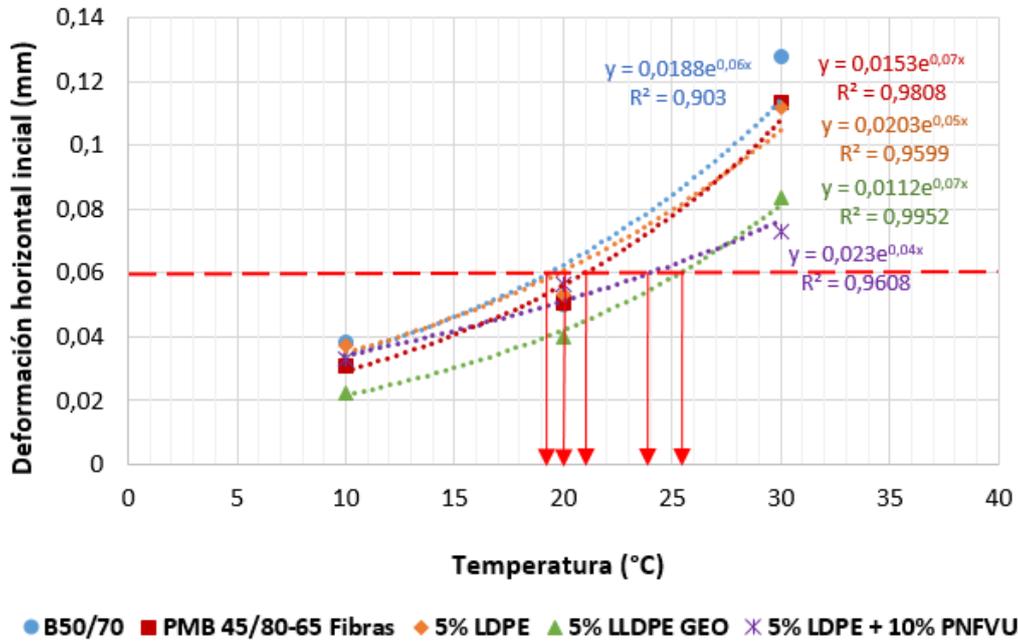


Figura 129. Deformación horizontal inicial para distintas temperaturas.

De igual modo, a medida que crece la temperatura, el efecto de las fibras del residuo de geomembrana (LLDPE GEO) y del caucho en la combinación de polímeros (LDPE + PNFVU) se hace más presente. Con ello se logra que la temperatura necesaria para alcanzar un mismo nivel de deformación inicial se incremente entre 7 y 10 grados con respecto al betún base cuando estos polímeros son empleados. Esto demuestra una menor susceptibilidad térmica de las mezclas en relación con la mezcla modificada comercial (PMB 45/80-65 Fibras).

Finalmente, en la Figura 130 se muestra la evolución del parámetro medio de daño de las distintas mezclas con respecto a la temperatura de ensayo. De este modo, se pueden confirmar algunas de las observaciones referidas en la Figura 128 y ver cómo la sustitución del betún convencional por los betunes modificados con polímeros reciclados, además de incrementar el número de ciclos hasta la fisuración, también es capaz de retrasar el consumo de energía necesario para disipar las tensiones recibidas.

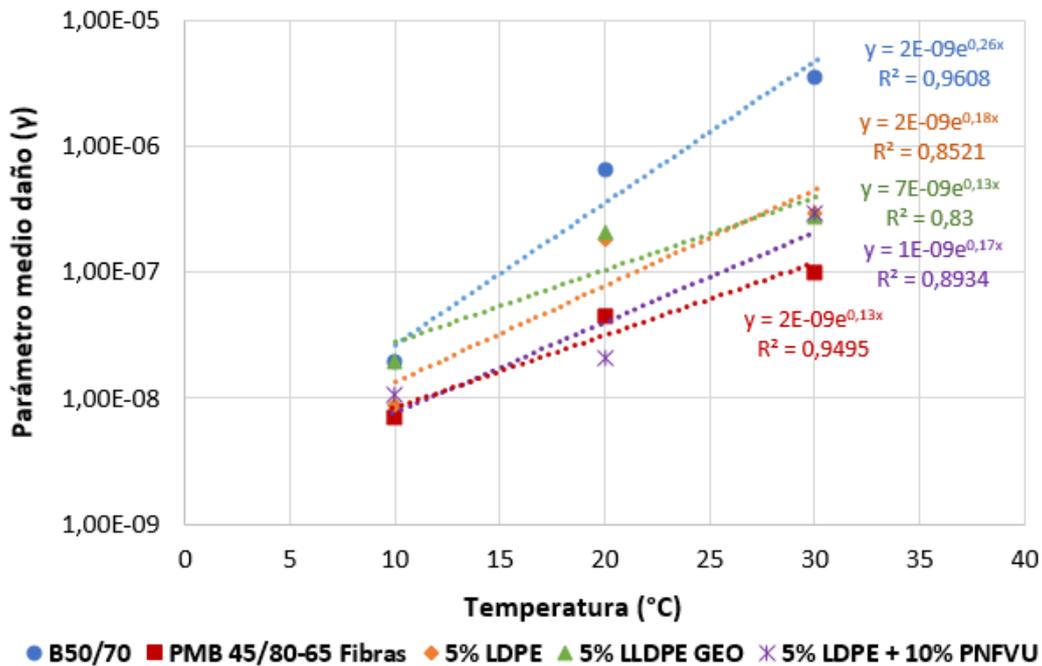


Figura 130. Evolución del parámetro medio de daño para distintas temperaturas.

A medida que se incrementa la temperatura también crecerá la energía total disipada por las distintas mezclas y las diferencias entre ellas se hacen más marcadas. De nuevo es la combinación de polietileno y PNFVU reciclados la que consigue unos niveles de daño más cercanos a la solución modificada convencional demostrando una susceptibilidad térmica similar a la de este material.

Con todos estos resultados, queda de manifiesto que la adición de polímeros reciclados a las mezclas bituminosas aplicadas a firmes consigue mejorar considerablemente el comportamiento mecánico de los mismos cuando se comparan con mezclas fabricadas con betún convencional, llegando a niveles de desempeño del orden (o superiores) a las de las mezclas fabricadas con betunes modificados en refinería con y sin la presencia de fibras. De igual modo, la aplicación de este tipo de polímeros reciclados consigue mejorar incluso el comportamiento de la mezcla modificada de referencia con fibras en aspectos como la susceptibilidad al agua (LLDPE GEO) o la resistencia a las deformaciones permanentes (LDPE + PNFVU).

5.2.3 Comparativa del efecto del empleo de polímeros reciclados a distintas escalas de la mezcla bituminosa

En este último apartado se emplean los resultados previos obtenidos de la caracterización de ligantes, morteros y mezclas bituminosas modificados con polímeros reciclados para evaluar el

grado en el que las propiedades aportadas por estos materiales se transmiten a las distintas escalas de la mezcla bituminosa. Como medio para evaluar el grado de desempeño, las diferentes propiedades están referidas en términos de variación con respecto al betún base (B 50/70) y al betún modificado de referencia (PMB 45/80-65).

5.2.3.1 Rigidez

El primer parámetro a considerar es la rigidez del material que influirá en la capacidad portante del mismo. De este modo, en la Tabla 34 se muestran los valores de rigidez a distintas escalas para una misma temperatura de referencia de 35 °C.

Tabla 34. Comparativa entre escalas en términos de rigidez.

Ligante empleado	Ligante (G*,MPa)	Δ Betún base (%)	Δ Betún modif. ref. (%)	Mortero (G*,Mpa)	Δ Betún base (%)	Δ Betún modif. ref. (%)	Mezcla (E,Mpa)	Δ Betún base (%)	Δ Betún modif. ref. (%)
B 50/70	4.05E-01	-	-	9.91E+02	-	-	2.51E+03	-	-
PMB 45/80-65	3.99E-01	-1.6	-	8.88E+02	-10.4	-	2.18E+03	-13.4	-
LDPE	7.34E-01	81.2	84.1	1.23E+03	23.7	38.0	2.87E+03	14.0	31.7
LLDPE GEO	7.90E-01	95.0	98.2	1.13E+03	13.6	26.7	3.10E+03	23.4	42.5
LDPE + PNFVU	1.20E+00	195.3	200.2	1.04E+03	4.5	16.6	2.77E+03	10.3	27.4

En primer lugar, es posible observar cómo las variaciones entre materiales con respecto a los betunes de referencia son mucho más elevadas en el caso del ligante que al comparar en términos de mortero o de mezcla. Esto es debido al carácter predominantemente físico de la modificación del ligante. Tal y como se apreciaba al analizar la microestructura de los betunes modificados (Figura 98, Figura 99), la presencia de fibras o de partículas de caucho en el betún hace que la rigidez observada a nivel ligante sea más elevada que rigidez real fruto de la adición de los plastómeros y/o el caucho. Pese a esto, la propia naturaleza de los polímeros empleados dará lugar a una rigidez más elevada en cualquier caso al comparar con el betún modificado de referencia.

La presencia de estos materiales hace que, a mayor complejidad del material, parte de la rigidez observada sea mayor, lo que queda de manifiesto una vez que cambiamos de escala hasta nivel de mortero. Al emplearse los polímeros y fibras presentes en el betún en la interacción con el filler y el árido fino, los aumentos de rigidez en relación a los betunes de referencia son menos marcados. A este nivel ya es posible apreciar el efecto del caucho a nivel de mezcla, el cual, aunque da lugar a un aumento de rigidez, también contribuye a que dicho aumento sea menor

que en el caso de la adición de fibras. Esto favorece su empleo en mezclas que requieran una mayor flexibilidad y estén sometidas a temperaturas más bajas (donde una rigidez elevada puede dar lugar a un comportamiento más frágil).

Cuando el efecto se traslada a nivel de la mezcla completa, si bien las diferencias permanecen en un rango de magnitud similar y los betunes modificados siguen contando con mayor capacidad portante, la interacción con el resto de áridos da lugar a algunas variaciones. De este modo, mientras que el betún modificado en refinería y el polietileno se mantienen con unas diferencias similares a las encontradas a nivel de mortero, en el caso de la geomembrana (LLDPE GEO) y la combinación con caucho (LDPE + PNFVU) las diferencias con el betún base y el modificado se incrementan ligeramente. Esto es debido a que el efecto de las fibras y el caucho no se ve influido exclusivamente por la interacción con el árido fino, sino que en la contribución de estos materiales también interviene su relación con el resto del esqueleto mineral de la mezcla.

A tenor de los resultados, se demuestra que la adición de polímeros reciclados es capaz de incrementar la capacidad portante del material al que se aplican en todas las escalas de la mezcla, aunque dicho efecto será menor que al considerar el betún de manera aislada. De esta forma queda probada, además, la necesidad del análisis multiescalar para evaluar la capacidad portante del material. El empleo del mortero permite matizar las diferencias observadas a nivel de betún y considerar las diferencias entre materiales a un nivel donde se parte de un contenido análogo de huecos y se evalúa la interacción con los áridos finos. Esto será especialmente importante en materiales donde la complejidad del polímero sea mayor, haciendo necesario el empleo de técnicas como el AFM para evaluar el comportamiento de los mismos. Por último, la traslación del material a nivel de mezcla permitirá precisar completamente las diferencias observadas en el resto de niveles.

5.2.3.2 Ángulo de fase

Al igual que era posible establecer correlaciones entre la rigidez del ligante y el mortero, en la Tabla 35 se incluyen las diferencias entre estas dos escalas en términos de comportamiento viscoelástico a través de las variaciones de ángulo de fase.

Tabla 35. Comparativa entre escalas en términos de comportamiento viscoelástico.

Ligante empleado	Ligante (Ángulo fase, °)	Δ Betún base (%)	Δ Betún modif. ref. (%)	Mortero (Ángulo fase, °)	Δ Betún base (%)	Δ Betún modif. ref. (%)
B 50/70	6.96E+01	-	-	1.91E+01	-	-
PMB 45/80-65	5.76E+01	-17.2	-	1.65E+01	-13.7	-
LDPE	6.41E+01	-7.9	11.2	1.70E+01	-11.0	3.1
LLDPE GEO	6.21E+01	-10.7	7.9	1.86E+01	-2.4	13.1
LDPE + PNFVU	5.30E+01	-23.8	-8.0	1.55E+01	-18.8	-5.9

De este modo, se puede observar cómo las diferencias entre tipologías son, en términos generales, menos marcadas que en caso de la reología del ligante (Figura 93) ya que, en este caso, la presencia de los áridos y el filler contribuye a que el comportamiento del conjunto sea más similar. Pese a ello, aún se puede apreciar como el betún base es el que mayor valor de ángulo de fase presenta reduciéndose este a medida que se añaden distintos polímeros. Estos presentarán un comportamiento menos viscoso y más elástico especialmente en el caso de la combinación de polietileno y caucho (LDPE + PNFU).

5.2.3.3 Susceptibilidad a humedad

Otro de los factores más importantes a la hora de evaluar el desempeño de los ligantes modificados con polímeros reciclados es su interacción con los áridos y como esta se ve afectada por la acción del agua. En la Tabla 36 se recogen la variación de los morteros y las mezclas frente a este fenómeno evaluados a partir de un mismo acondicionamiento:

Tabla 36. Comparativa entre escalas en términos de resistencia a la humedad.

Ligante empleado	Mortero (MPa)	Δ Betún base (%)	Δ Betún modif. ref. (%)	Mezcla (kPa)	Δ Betún base (%)	Δ Betún modif. ref. (%)
B 50/70	8.81E+01	-	-	8.19E+01	-	-
PMB 45/80-65	9.08E+01	3.1	-	9.33E+01	13.9	-
LDPE	9.36E+01	6.3	3.1	9.07E+01	10.7	-2.8
LLDPE GEO	9.64E+01	9.5	6.2	9.96E+01	21.6	6.8
LDPE + PNFVU	9.28E+01	5.3	2.2	9.13E+01	11.5	-2.1

Se puede apreciar cómo, al estar concebido el mortero para evaluar la interacción con el mástico y el árido, este ensayo es capaz de evaluar las diferencias entre tipologías mostrando las mismas tendencias que el caso del ensayo de mezclas (sensibilidad al agua, EN 12697-12) cuando se

compara con el betún base. Así, queda explícito desde el nivel de mortero cómo el residuo de geomembrana es el que presenta un mejor comportamiento frente a la acción del agua.

Cuando pasamos a nivel de mezcla, dichas diferencias se hacen más marcadas al comparar con el betún base. Esto se debe a la influencia de los polímeros en la densificación y trabajabilidad de la mezcla en contraposición al mortero, para el cual se parte de un mismo contenido de huecos. No obstante, esto solo repercute en un desempeño aún mejor de las mezclas modificadas con polímeros reciclados en relación al ligante base y en una adecuada resistencia de estas a la acción del agua (> 90%).

5.2.3.4 Resistencia a las deformaciones permanentes

El empleo de polímeros contribuye a mejorar la capacidad de las mezclas bituminosas de resistir el paso del tráfico sin experimentar deformaciones permanentes. La Tabla 37 recoge la diferencia entre tipologías para parámetros que evalúan este fenómeno a nivel de ligante y mezclas asfálticas.

Tabla 37. Comparativa entre escalas en términos de resistencia a las deformaciones permanentes.

Ligante empleado	L-Index	Δ Betún base (%)	Δ Betún modif. ref. (%)	Prof. Roderá (mm)	Δ Betún base (%)	Δ Betún modif. ref. (%)
B 50/70	6.55	-	-	3.41	-	-
PMB 45/80-65	0.08	-98.8	-	2.21	-35.2	-
LDPE	1.05	-84.0	1190.1	2.73	-19.8	23.6
LLDPE GEO	0.47	-92.9	475.0	2.39	-29.8	8.2
LDPE + PNFVU	0.04	-99.4	-49.6	1.21	-64.5	-45.2

Se puede apreciar que, tanto a nivel de ligante como para la mezcla completa, la incorporación de polímeros reciclados logra reducir la susceptibilidad del material con respecto al betún base (B 50/70), aproximándose a las prestaciones del betún modificado de referencia tras la adición de polietileno (más en el caso de la geomembrana). En el caso de la combinación con caucho (LDPE + PNFVU), se logra incluso superar las prestaciones del betún modificado en refinería, siendo escalable dicho efecto a nivel de mezcla.

Tanto el L-Index a nivel de ligante, como la profundidad de rodera en mezclas muestran la misma tendencia, aunando en ambos casos la evaluación tanto de la resistencia a las deformaciones permanentes como de la recuperación elástica del material. No obstante, la interacción del

polímero, las fibras o el polvo de caucho con los áridos contribuye a que las diferencias observadas a nivel de ligante se hagan más marcadas.

5.2.3.5 Resistencia a la fatiga

Por último, en la Tabla 38 se recogen las variaciones entre tipologías de polímeros en términos de resistencia a la fatiga evaluada a través del equipo DMA en morteros y del equipo UGR-FACT en mezclas bituminosas.

Tabla 38. Comparativa entre escalas en términos de resistencia a la fatiga.

Ligante empleado	Mortero (Ciclos rotura)	Δ Betún base (%)	Δ Betún modif. ref. (%)	Mezcla (Ciclos rotura)	Δ Betún base (%)	Δ Betún modif. ref. (%)
B 50/70	6.89E+03	-	-	5.82E+01	-	-
PMB 45/80-65	6.92E+04	905.6	-	7.12E+02	1123.6	-
LDPE	1.61E+04	133.3	-76.8	1.55E+02	167.0	-78.2
LLDPE GEO	1.88E+04	173.3	-72.8	2.36E+02	305.2	-66.9
LDPE + PNFVU	5.82E+04	745.0	-16.0	8.01E+02	1276.8	12.5

Es posible comprobar cómo las variaciones entre los betunes de referencia y los materiales que incorporan los betunes modificados con polímeros de tipo polietileno (LDPE y LLDPE GEO) son en ambos casos del mismo orden, siendo especialmente similares en el caso de la comparación con el ligante modificado de referencia (PMB 45/80-65). Esto confirma la importancia de la interacción entre los distintos polímeros y los áridos finos a la hora de determinar la resistencia a fatiga de las mezclas y la utilidad de un análisis a nivel de mortero para evaluar este tipo de fenómeno.

En el caso de la combinación con caucho (LDPE + PNFVU) por su parte, sí se producen variaciones al pasar al nivel de mezcla completa incrementándose las mejoras en relación al betún base (algo que ya ocurría en menor medida por la presencia de fibras en el residuo de geomembrana) y la mezcla modificada de referencia. Esto indica que las ventajas observadas a nivel de mortero no solo son extrapolables a nivel de mezcla, sino que posiblemente el mayor potencial del empleo de los polímeros en términos de resistencia a la fisuración se alcanza tras la interacción con el resto del esqueleto mineral en la mezcla completa.

Con todo ello, los resultados expuestos confirman el hecho de los valores de reología son claves para entender el comportamiento de la mezcla, por la gran importancia del ligante dentro de la misma. Así mismo, la interacción del betún con el resto de componentes modificará en cierta medida las propiedades finales de la mezcla y el comportamiento de la misma frente a

fenómenos como la fisuración, las deformaciones plásticas o la susceptibilidad al agua siendo necesario el estudio en cada escala para entender de manera completa el modo en el que actúan los distintos polímeros reciclados. Después del análisis de las distintas variables, se puede afirmar que los efectos observados a las distintas escalas de estudio son extrapolables a nivel de mezcla, lo que dota de garantías a la evaluación realizada a nivel de ligante y mortero.

En base a lo observado, y pese a que todos los polímeros son capaces de mejorar las propiedades mecánicas de la mezcla, los dos polímeros que mejores prestaciones aportan son el residuo de geomembrana (LLDPE GEO) y la combinación de polietileno de procedente de consumo doméstico y polvo de neumático (LDPE + PNFVU). El primero aporta una mayor rigidez y resistencia a las deformaciones permanentes que el polietileno de origen doméstico (LDPE) además de ser el material menos susceptible a la acción del agua. Por otro lado, la combinación del polietileno con el caucho, también cuenta con una elevada capacidad portante y es el polímero con mayor resistencia a la deformación permanente (confirmado a nivel de ligante y mezcla) llegando a igualar e incluso superar la resistencia a la fisuración de la mezcla de referencia (PMB 45/80-65 + 0.3% Fibras) a las temperaturas más altas.

5.3 Influencia del modo de adición del polímero reciclado en las características de las mezclas bituminosas: vía húmeda vs vía seca

Una vez probada la aptitud del empleo de los polímeros reciclados como modificadores del ligante (vía húmeda), este apartado recoge el análisis de viabilidad de su empleo por vía seca con el fin de facilitar la aplicabilidad en planta y la extensión del empleo de estos materiales.

Para ello, se compararon las curvas de compactación de mezclas tipo SMA 11 fabricadas con el ligante modificado con polietileno de uso doméstico (5% LDPE) con mezclas que incorporaran el mismo contenido de polímero (de manera que los beneficios de tipo económico y ambiental sean análogos) pero empleando dicho polímero como un árido más. Así, en la Figura 131 se muestra la evolución de la densidad obtenida tanto para la mezcla SMA 11 fabricada con el betún base (B 50/70), como la variación de esta al incorporar el polietileno reciclado por vía seca o a través del ligante modificado previamente desarrollado (vía húmeda).

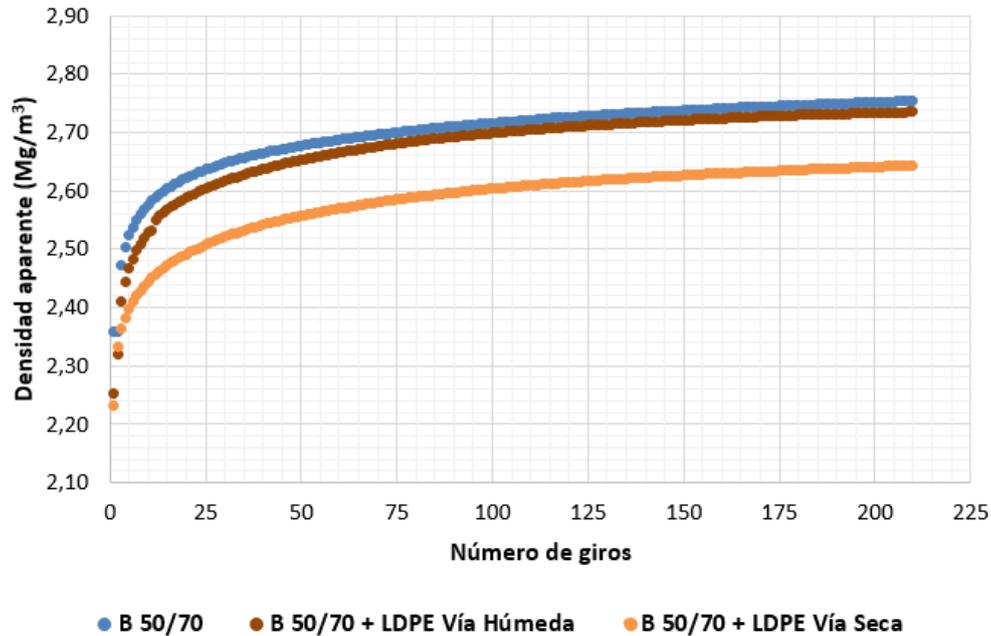


Figura 131. Comparativa de trabajabilidad entre mezclas modificadas con polímeros de tipo LDPE.

En ella se puede apreciar que, pese a que la incorporación del aditivo por vía húmeda reduce en cierto modo la densidad con respecto a la mezcla de referencia, esta disminución puede asumirse como un efecto habitual ligado a la incorporación de polímeros. Sin embargo, en el caso de la incorporación por vía seca, esta reducción se hace mucho más marcada (pese a incorporar la misma cantidad de polietileno). Esto se traduce en la necesidad de mayores energías de compactación (a través de un mayor número de giros) para alcanzar una densidad análoga a la obtenida con el ligante modificado (vía húmeda). Por este motivo, el empleo por vía seca prueba dar lugar a mezclas menos trabajables.

En relación con lo anterior, en la Figura 132 se puede observar la evolución del contenido de huecos de las tres mezclas en relación al número de giros empleado en la compactación. Así, se puede observar cómo si se establece un contenido efectivo de huecos del 5% (un contenido intermedio para este tipo de mezclas (Costa et al., 2014)), las mezclas fabricadas con el betún base y el betún modificado con LDPE reciclado alcanzan dicho objetivo para 35 y 25 giros de compactación respectivamente (el empleo del polímero reduce sensiblemente el contenido de huecos). Sin embargo, para las mezclas que emplean el polietileno sin incorporarlo previamente al betún (vía seca), se necesitan 65 giros, más del doble de la energía necesaria al emplear el plastómero por vía húmeda, confirmando la menor trabajabilidad de esta mezcla.

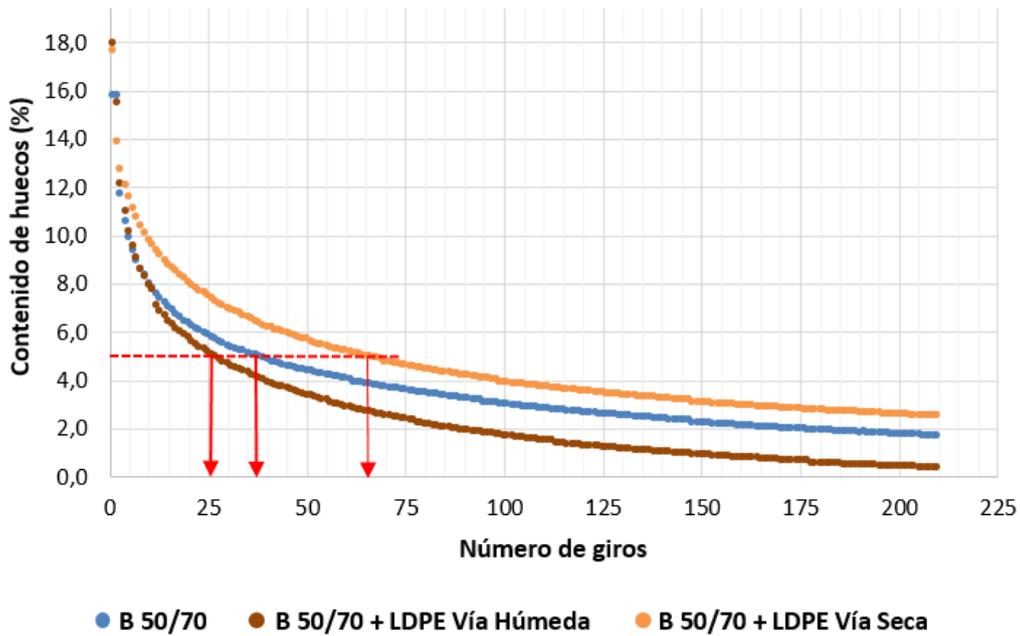


Figura 132. Determinación del número de giros para las distintas tipologías de mezcla.

Establecido el número de giros necesario para obtener el mismo contenido de huecos, en la Figura 133 se muestra la diferencia de resistencia a tracción indirecta de las distintas mezclas como forma de evaluar la interacción entre los distintos componentes de las mismas:

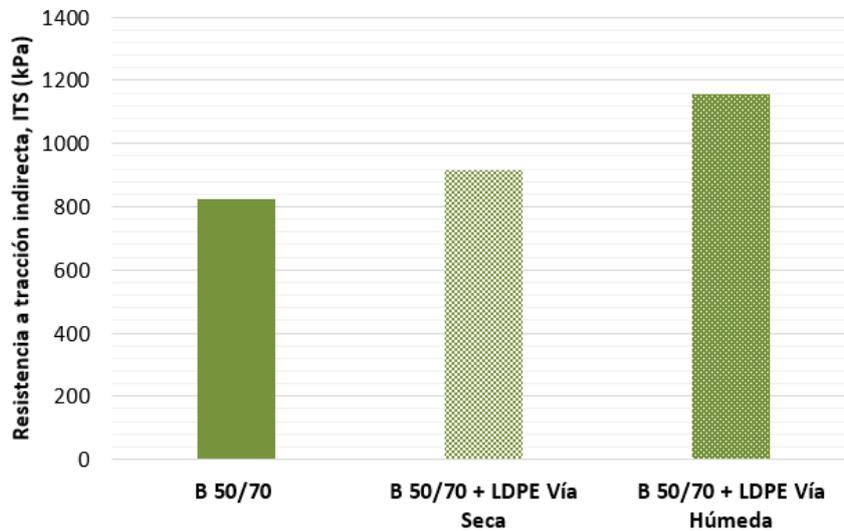


Figura 133. Resistencia promedio a tracción indirecta a 25°C para un mismo contenido de huecos.

Observando dichos valores, se puede comprobar cómo, pese a que en todos los casos la envuelta de los árido es adecuada y la rotura lineal (tal y como se muestra en la Figura 134), existen diferencias en las resistencias obtenidas. Así, se puede comprobar en primer lugar, como la adición del polietileno en cualquiera de los casos, incrementa la resistencia de la mezcla si se compara con la del betón base sin polímeros. No obstante, existe una notable diferencia entre

la efectividad obtenida por uno y otro método de incorporación. Mientras que por vía húmeda la resistencia se incrementa en torno a un 40%, la adición por vía seca solo logra mejorar la resistencia a tracción indirecta alrededor de un 11%.

Este hecho sumado a la mayor trabajabilidad de la mezcla que incorpora el polímero reciclado por vía húmeda, aboga por el empleo de esta técnica en lugar de la vía seca en el resto del estudio al conseguir maximizar la mejora de propiedades obtenidas.



Figura 134. Aspecto de las distintas mezclas tras su rotura a tracción indirecta.

5.4 Estudio del comportamiento mecánico a largo plazo de mezclas bituminosas aplicadas a distintas infraestructuras de transporte

Demostradas las posibilidades del empleo de distintos polímeros reciclados para la mejora de las propiedades mecánicas de betunes asfálticos, en esta sección se muestran los resultados relativos a la influencia de estos materiales en la mejora de las características estructurales y a largo plazo de mezclas bituminosas empleadas en distintas infraestructuras de transporte: pavimentos para carreteras, subbalasto bituminoso para vías ferroviarias y pavimentos empleados en puertos.

5.4.1 Aplicación de mezclas con polímeros reciclados para la mejora estructural de carreteras

Habiendo constatado la mejora de la capacidad portante, resistencia a la deformación y susceptibilidad al agua de las mezclas modificadas con polímeros reciclados, en este apartado se muestran los resultados relativos a la durabilidad de la mezcla en términos de resistencia a la fisuración por fatiga para distintos niveles de carga y resistencia al envejecimiento comparando con las mezclas de referencia: B50/70 y PMB 45/80-65 + 0.3% Fibras (por ser la de mejores propiedades de entre las que emplean el betún modificado de referencia).

5.4.1.1 Resistencia a la fisuración a distintos niveles de carga

Tras haber evaluado la influencia de la temperatura para este fenómeno durante la caracterización de la mezcla (Figura 128), en la Figura 135 se muestran los valores promedio de resistencia a la fisuración por fatiga de las distintas mezclas estudiadas para distintos niveles de carga.

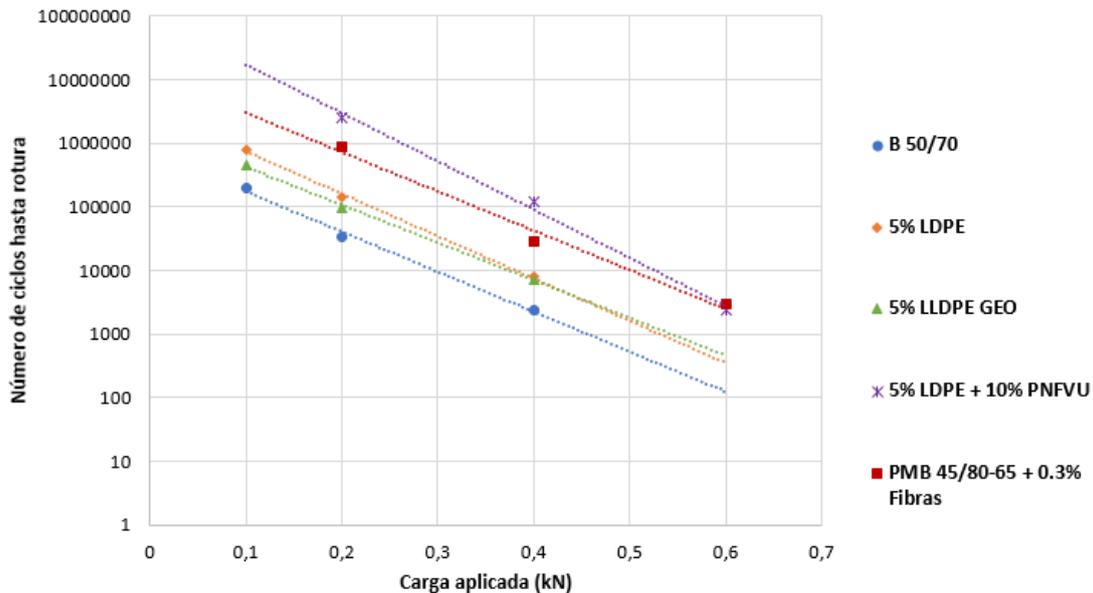


Figura 135. Evolución de la resistencia promedio a la fisuración de las distintas mezclas para distintos niveles de carga.

Así, puede apreciarse cómo para todo el rango de cargas estudiado la adición de polímeros de tipo polietileno es capaz de mejorar la resistencia a la fisuración de la mezcla fabricada con el betón base (B 50/70) dando lugar a mezclas capaces de mayor durabilidad que reducen la necesidad de tareas de mantenimiento. En este sentido, las mezclas que incorporan polietileno (ya sea el procedente del reciclaje doméstico o el de residuo de geomembrana) se sitúan en niveles de resistencia intermedios entre la mezcla convencional y la que emplea el betón modificado comercial con fibras. La presencia de las fibras en el residuo de geomembrana (LDPE GEO) como elemento anti fisuración no se pone de manifiesto hasta los niveles más altos de carga a partir de los cuales la resistencia de esta mezcla supera la del polietileno de uso doméstico (LDPE).

En relación a la combinación del polietileno y el caucho procedente del reciclaje de neumáticos (LDPE + PNFVU) se observa cómo, para todo el rango de cargas estudiado, no solo se logra mejorar el comportamiento frente a la fatiga con respecto al betón base, sino que se mejoran las prestaciones de la mezcla modificada de referencia (PMB 45/80-65 Fibras). Esto es aún más

reseñable si se considera que, a medida que la carga exigida es menor, la diferencia se acrecienta. Esto implica un mejor comportamiento en vías con unos niveles de tráfico menores (vías locales y secundarias) sin renunciar a un comportamiento similar en vías de alta concentración de tráfico, dotando de versatilidad al material desarrollado.

En relación con esto último, en la Figura 136 se muestran las leyes de fatiga de las distintas mezclas en función de la deformación horizontal inicial (tras 100 ciclos de carga) obtenida para los distintos niveles de carga. Esta representación permite caracterizar el comportamiento de las mezclas y comprobar cómo tanto la mezcla modificada con el betún modificado de referencia (PMB 45/80-65 Fibras) como la combinación de LDPE y PNFVU muestran un comportamiento muy similar y menos sensible a los cambios de carga, lo que confirma la mayor versatilidad del empleo de estos materiales (tanto para vías de menor carga de tráfico como en vías de mayor intensidad).

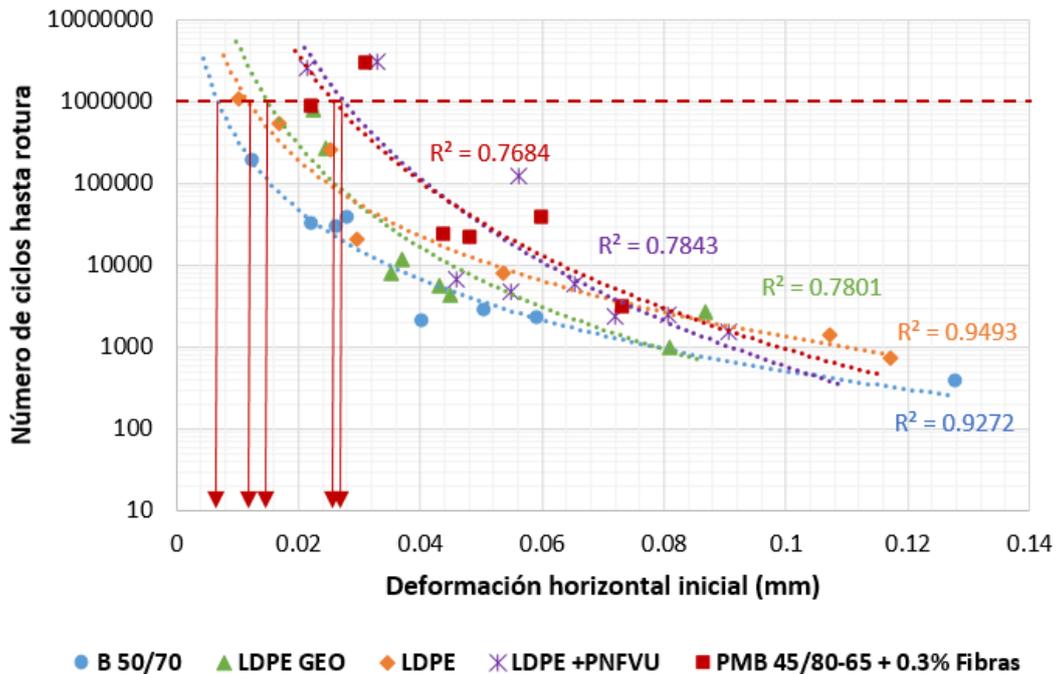


Figura 136. Leyes de fatiga de las distintas mezclas estudiadas en función de la deformación inicial registrada.

Por otra parte, si se establece un número de ciclos de referencia (por ejemplo, 1000000 de ciclos como los requeridos en el PG-3 para la evaluación de la fatiga en mezclas de alta capacidad portante), se puede observar cómo las mezclas modificadas con polímeros reciclados son capaces de resistir una mayor cantidad de deformación inicial con respecto al betún base. Esto indica que estas mezclas, especialmente la combinación de polietileno y caucho (LDPE + PNFVU), retrasan en mayor medida el inicio del daño incrementando su durabilidad. Alternativamente, estas mezclas son capaces de resistir una mayor carga para un mismo nivel de daño. Con ello,

se confirma la mejora de la resistencia a la fisuración de la mezcla desde el momento inicial de su aplicación en relación con el betún convencional (B 50/70).

Por otra parte, en la Figura 137 se muestra la evolución del parámetro medio de daño promedio de las distintas tipologías de mezcla en función de la carga aplicada. Así, se puede apreciar cómo en términos generales, cuanto mayor es el nivel de carga mayor es el daño causado (derivado de una mayor cantidad de energía disipada y un menor número de ciclos resistidos) volviéndose más marcadas las diferencias entre tipologías.

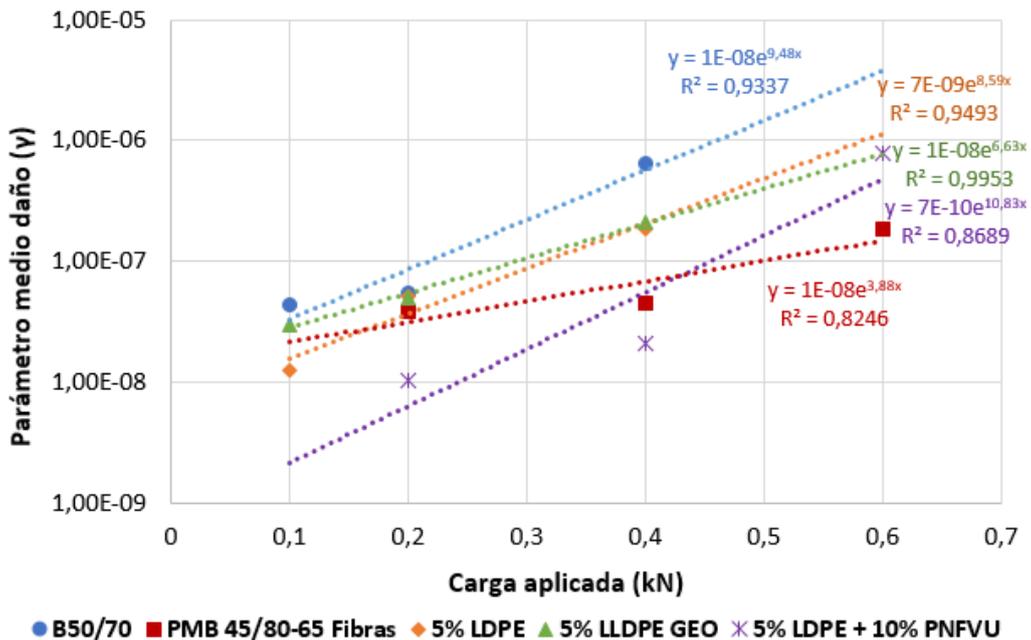


Figura 137. Evolución del parámetro medio de daño para distintos niveles de carga.

De este modo, las dos mezclas que incorporan polietileno muestran ser capaces de reducir considerablemente el daño de la mezcla durante toda su vida útil con respecto a la mezcla convencional (B50/70). La mayor tasa de mejora se logra de nuevo mediante la combinación con PNFVU para la cual y, siguiendo la tendencia observada en la Figura 135, se logran resistencias que incluso superan las obtenidas para la mezcla modificada con ligante comercial (PMB 45/80-65 Fibras) para las cargas bajas y medias (las correspondientes a vías nacionales, secundaria y locales).

Finalmente, en las siguientes figuras puede apreciarse el aspecto de las distintas mezclas tras la fisuración. En todos los casos e independientemente del tipo de ligante empleado, se observa una buena envuelta de los áridos y un fallo de la mezcla a través de la rotura de los mismos lo que indica la inexistencia de problemas de adhesividad entre el ligante y el esqueleto mineral.



Figura 138. SMA 11 con B50/70 tras rotura.



Figura 139. SMA 11 con PMB 45/80-65 y 0.3 % Fibras tras rotura.



Figura 140. SMA 11 con LDPE de consumo doméstico tras rotura.



Figura 141. SMA 11 con LLDPE procedente de geomembrana tras rotura.



Figura 142. SMA 11 con LDPE y PNFVU tras rotura.

5.4.1.2 Resistencia de la mezcla al envejecimiento

El envejecimiento es un aspecto clave en la durabilidad de las mezclas bituminosas, por ello tras haber evaluado ya este fenómeno a nivel de ligante, en este apartado se muestran los resultados de resistencia ante la acción combinada de la humedad y el envejecimiento a nivel de mezcla.

El aspecto de las probetas saturadas o no en agua tras el envejecimiento mediante el ensayo SATS puede verse en la Figura 143. En ella, se aprecia cómo las probetas situadas bajo el agua adquieren un color marrón en lugar del negro característico del betún y, en términos generales, un aspecto menos brillante señal del envejecimiento del material.



Figura 143. Aspecto de las distintas mezclas tras el ensayo SATS.

En la Figura 144, se muestran los resultados de las distintas probetas ensayadas representando la saturación retenida por estas tras el acondicionamiento frente a la relación de rigideces obtenida como ratio entre el valor de módulo a 20°C antes y después del SATS.

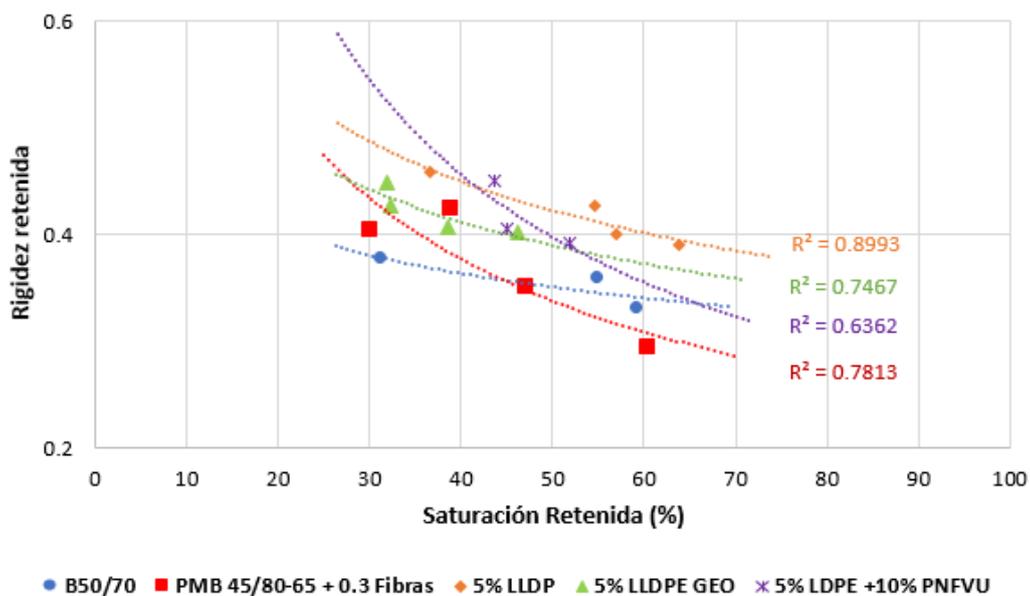


Figura 144. Rigidez y saturación retenidas para el ensayo SATS de las distintas mezclas.

Observando la figura se puede apreciar como la saturación retenida condiciona en gran medida la rigidez conservada tras el ensayo. De este modo, hay tipologías de mezcla más susceptibles a estos cambios como son las dos mezclas de referencia (B50/70 y PMB 45/80-65). Las mezclas que incorporan los polímeros reciclados suelen mostrar, por su parte e independientemente de su posición dentro de la cámara de acondicionamiento, unos niveles de saturación y rigidez conservada más homogéneos entre sí, indicando de este modo una mayor resistencia al efecto combinado del envejecimiento y la humedad.

Entrando a la valoración de la resistencia al envejecimiento como tal, en la Figura 145 se muestra la variación del valor de módulo de rigidez promedio de las distintas probetas acondicionadas en el ensayo SATS por encima del nivel de agua.

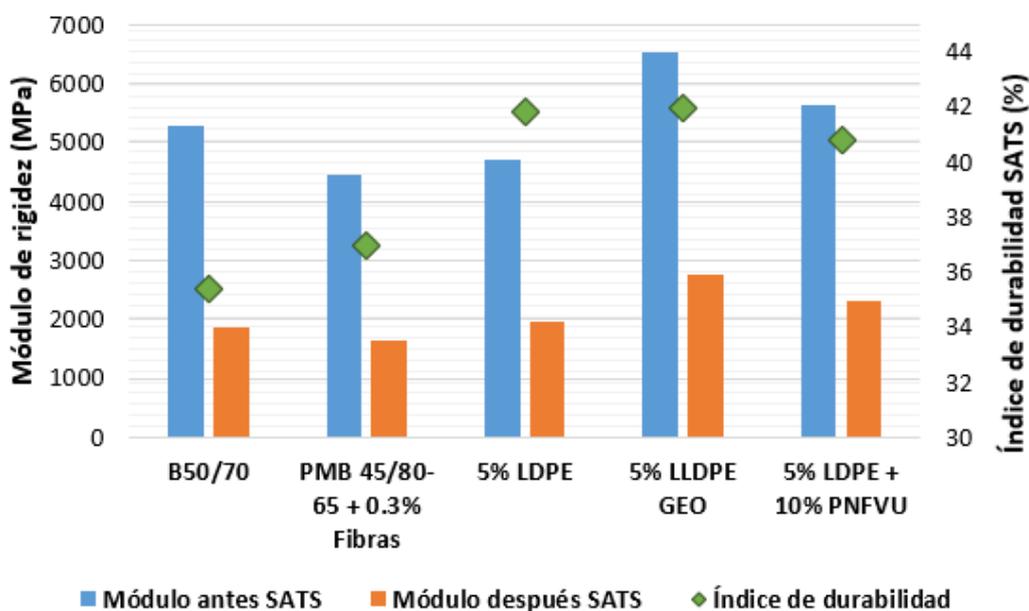


Figura 145. Valores promedio de módulo e índices de durabilidad de las distintas mezclas tras el ensayo SATS.

Se comprueba cómo, en todos los casos el envejecimiento de las muestras en condiciones de humedad da lugar a una reducción significativa del valor de módulo de rigidez para todas las tipologías de mezcla. A través de dichas relaciones, se determina el índice de durabilidad SATS.

De este modo se percibe de manera clara cómo el empleo de polietileno, de manera aislada o tras su combinación con caucho, no solo logra un nivel de resistencia al envejecimiento y a la humedad del mismo orden que las mezclas de referencia, sino que, en las tres mezclas estudiadas, la presencia del polietileno y las fibras logran mejorar la resistencia a la humedad incluso con el paso del tiempo dando lugar a una resistencia al envejecimiento del orden de un 18% mayor. En el caso de la combinación de LDPE y PNFVU, aunque la durabilidad es algo inferior

a las mezclas que emplean únicamente polietileno, la traslación de las propiedades antienviejimiento del caucho observadas en el estudio de la reología posibilitan que la resistencia a este fenómeno en condiciones de humedad sea un 15% superior a las de las mezclas de referencia, incrementando así la durabilidad de la mezcla.

5.4.2 Aplicación mezclas con polímeros reciclados para la mejora estructural de infraestructuras ferroviarias

En este apartado se muestran los resultados relativos a la aplicación de las mezclas modificadas con polímeros reciclados como subbalasto bituminoso. Para ello se comparan las mezclas de tipo SMA 11 con polímeros reciclados de mejores prestaciones: LDPE + PNFVU y LLDPE GEO y la mezcla de referencia con betún modificado en refinería (PMB 45/80-65 + 0.3% Fibras) con dos mezclas habitualmente empleadas con este propósito: una mezcla AC 22 S con betún convencional B 50/70 y una mezcla de altas prestaciones y elevada capacidad portante fabricada con un betún modificado en refinería de características especiales (AC 22 S MAM).

5.4.2.1 Sensibilidad al agua de las mezclas

Entrando a evaluar de manera comparativa las dos tipologías de mezcla en lo referente a sus características mecánicas y capacidad estructural, en primer lugar, se sometieron las mezclas tipo AC 22 S empleadas como referencia al ensayo de sensibilidad al agua. En la Figura 146 se muestran los resultados relativos a estas mezclas en comparación con los obtenidos para las mezclas tipo SMA 11 modificadas con polímeros reciclados:

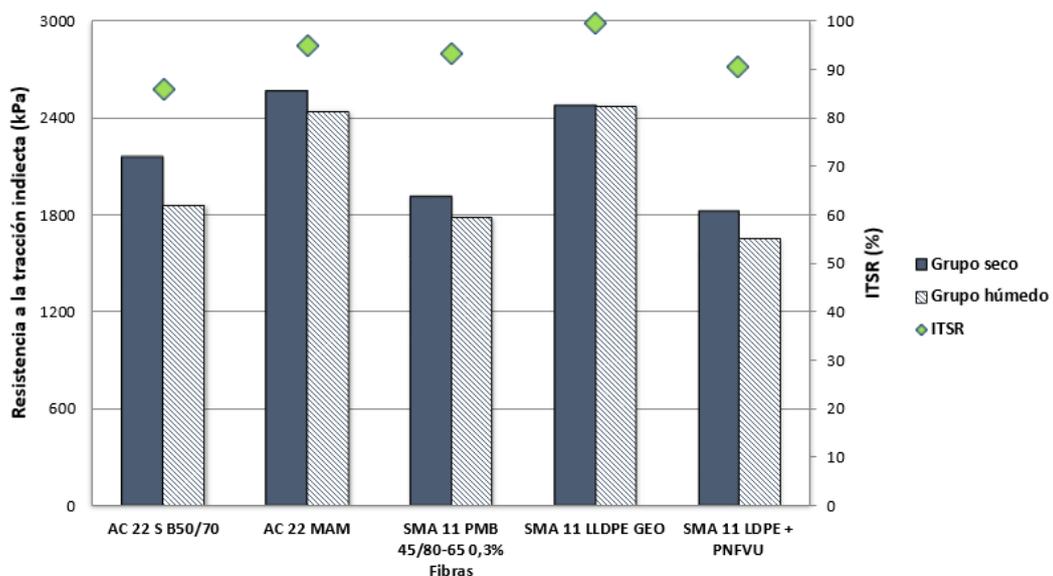


Figura 146. Resultados de resistencia a tracción indirecta y sensibilidad al agua para las mezclas estudiadas como subbalasto bituminoso.

Se puede observar cómo la mezcla convencional empleada como subbalasto (la mezcla tipo AC 22 S fabricada con betún convencional) presenta unos valores de resistencia a la tracción conservada algo inferiores al resto de mezclas (pese a cumplir con los requisitos exigibles a este tipo de mezcla). En este sentido, pese a que las mezclas SMA fabricadas con el betún modificado en refinería (PMB 45/80-65 + 0.3% Fibras) y con la combinación de LDPE + PNFVU tienen una resistencia a la tracción algo inferior, su comportamiento frente a la acción del agua supera al de la mezcla convencional con lo que, pese a tener un contenido de huecos algo superior, se demuestra que su susceptibilidad al agua es óptima.

En relación a la mezcla AC 22 fabricada con el betún de altas prestaciones, tanto sus valores de resistencia a tracción como su resistencia conservada tras el acondicionamiento al agua mejoran sustancialmente. No obstante, la mezcla que incorpora el polietileno reciclado procedente de geomembrana (LLDPE GEO) es capaz de alcanzar resistencias del mismo orden y una menor susceptibilidad al agua que supera ampliamente el 85% recomendado para subbalasto bituminoso (Administrador Infraestructuras Ferroviarias, 2011).

Se confirma de este modo que, en lo referente a la susceptibilidad al agua, las mezclas SMA con polímeros reciclados aportan unas características adecuadas para su empleo como subbalasto bituminoso.

5.4.2.2 Evaluación de la rigidez de las mezclas

Continuando con los distintos ensayos de caracterización del subbalasto, este debe tener una capacidad portante suficiente capaz de resistir el peso de los elementos de la infraestructura ferroviaria a los cuales sustenta y las cargas transmitidas por el tráfico. Por este motivo, era de interés comparar la rigidez de ambas tipologías de mezcla y la influencia de los polímeros en la misma.

En la Figura 147 se encuentran representados los valores de rigidez de las distintas mezclas estudiadas a distintas temperaturas. En ella, se puede apreciar cómo la mezcla AC 22 que incorpora el betún de altas prestaciones presenta, para todo el rango de temperaturas y tal y como era de esperar por sus características, unos elevados valores de rigidez que le aportan una capacidad portante notablemente superior al resto y más próxima a las características de una mezcla de alto módulo.

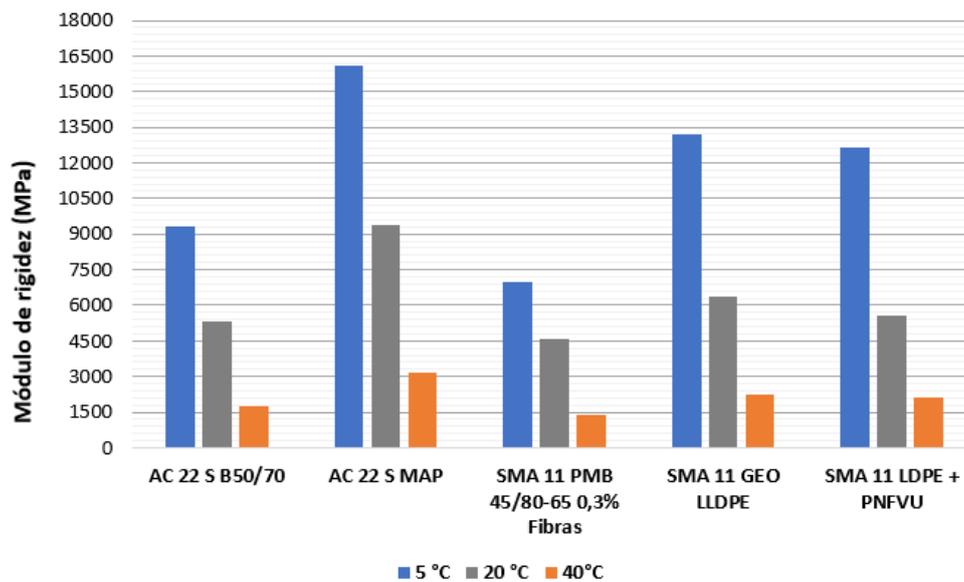


Figura 147. Módulo de rigidez promedio a distintas temperaturas de las mezclas empleadas como subbalasto bituminoso.

No obstante, las mezclas de tipo SMA fabricadas con los betunes modificados con polímeros reciclados presentan una rigidez igual o incluso superior a la de la mezcla AC 22 convencional habitualmente empleada como subbalasto bituminoso, mostrando de esta forma una capacidad portante adecuada para este uso en todo el rango de temperaturas estudiado. Únicamente la mezcla SMA elaborada con el betún modificado en refinería y la adición de fibras, muestra una rigidez algo inferior a la de la mezcla de referencia, pero incluso esta, pese a ser menos rígida que las mezclas con polímeros reciclados, está por encima de los 3700 MPa a 20°C recomendados para el empleo de mezclas bituminosas como subbalasto (Administrador Infraestructuras Ferroviarias, 2011).

5.4.2.3 Evaluación de la resistencia a las deformaciones permanentes de las mezclas

En relación a la evaluación de la resistencia a las deformaciones permanentes, en la Figura 148 se muestran los resultados del ensayo triaxial realizado a 40 °C. En ella se puede observar cómo, en términos de deformación, las mezclas tipo SMA son capaces de lograr unos niveles de resistencia similares a los de la mezcla AC 22 S normalmente empleada para este tipo de aplicación, disminuyendo además la fluencia del material.

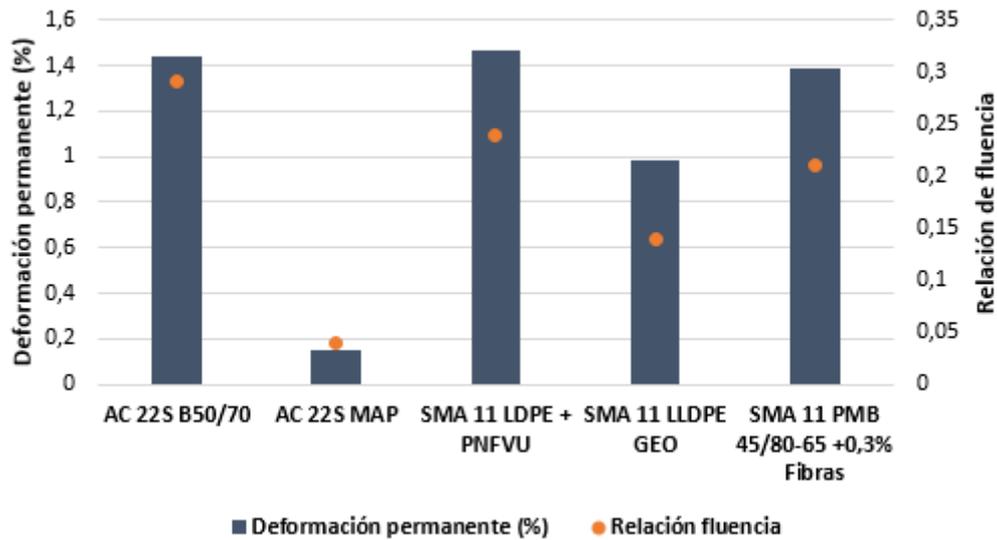


Figura 148. Evaluación de la deformación permanente a 40 °C de las distintas mezclas mediante el ensayo de compresión triaxial cíclico.

En este sentido, la mezcla que incorpora el residuo de geomembrana (SMA LLDPE GEO) es la que reduce en mayor proporción la deformación y la fluencia del material, aunque sin llegar a la reducción obtenida mediante el empleo del ligante modificado para mezclas de altas prestaciones.

En relación a esto último, se puede comprobar la estrecha relación que existe entre los valores de rigidez a 40 °C y la deformación obtenida en este ensayo, la cual explica las tendencias observadas y la mayor resistencia de la mezcla de altas prestaciones (AC 22S MAP). Ensayos como el de resistencia al punzonamiento, realizado más adelante, pueden ayudar a precisar la deformación efectiva que sufrirá el material al estar sometido a sollicitaciones más similares a las que se presentarían en la infraestructura real.

5.4.2.4 Evaluación de la resistencia a la fisuración

Más allá de la capacidad portante y la resistencia a la acción del agua y a las deformaciones permanentes, las capas de subbalasto bituminoso deben ser capaces de resistir la fatiga del material ya que la aparición de fisuras podría comprometer su integridad y, por ende, la de toda la infraestructura.

En la Figura 149 se puede ver la evolución de la resistencia a la fisuración evaluada mediante el ensayo UGR-FACT para distintos niveles de carga. De este modo, se puede comprobar cómo las distintas soluciones estudiadas para la mezcla SMA se sitúan en niveles que, si bien no alcanzan la resistencia de la mezcla AC 22 de 12 cm, sí mejoran en todos los casos la resistencia a la

fisuración de las mezclas comúnmente empleadas para este fin (AC 22 B50/70) a igualdad de espesores (6 cm).

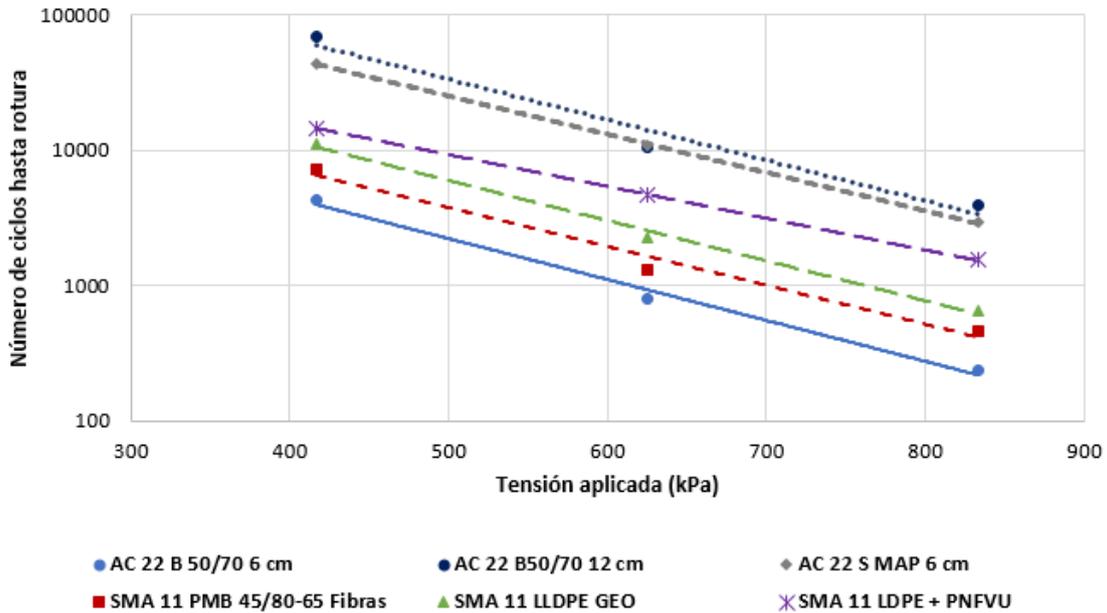


Figura 149. Leyes de fatiga de las distintas mezclas estudiadas para su empleo como subbalasto bituminoso.

Dentro de las dos soluciones con polímero reciclado propuestas, la combinación de polietileno y caucho reciclados (LDPE + PNFVU) es la que mejor comportamiento muestra. Esta no solo resiste un mayor número de ciclos, sino que permite acercarse al nivel de resistencia a la fisuración de la mezcla de altas prestaciones (AC 22 S MAP, la cual constituye la referencia en relación a la posible reducción de espesores) a medida que el nivel de carga aumenta, confirmando lo referido al respecto en trabajos como el de Navarro et al. 2010.

Junto a este análisis, en la Figura 150 se incluye para los distintos niveles de tensión aplicados la representación de la energía disipada durante los primeros 100 ciclos de aplicación de carga. Dicha energía es la medida del área encerrada durante los ciclos de histéresis que se producen en la evolución de la fisuración de las distintas mezclas bituminosas. Independientemente del tipo de mezcla analizado la cantidad de energía disipada se incrementa a medida que crece la carga aplicada.

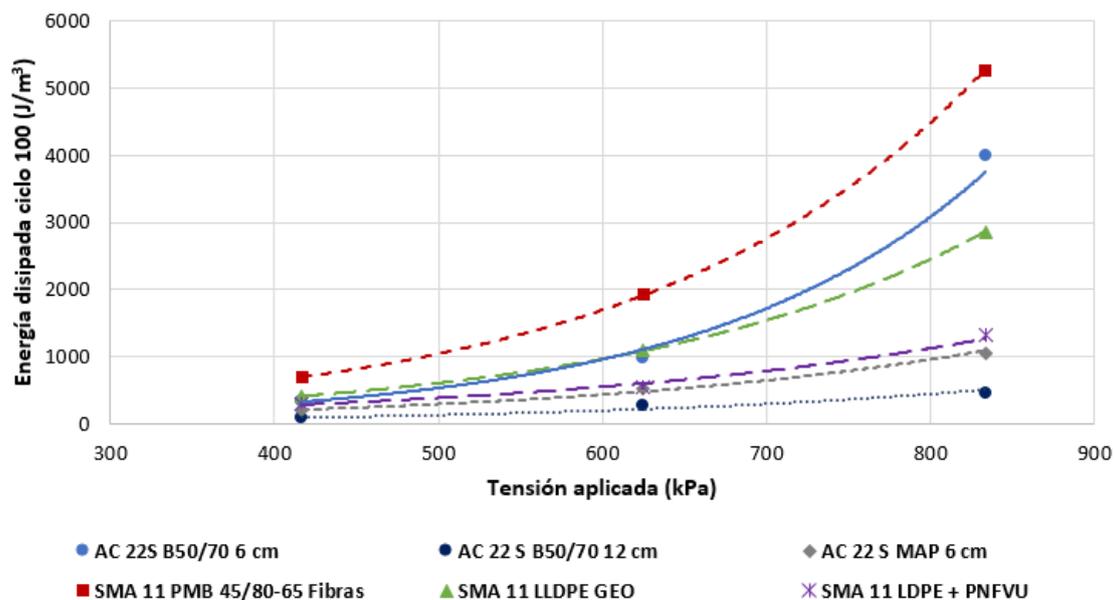


Figura 150. Energía inicial disipada para distintos niveles de carga.

Si analizamos las mezclas con un mismo espesor (6 cm), se puede observar como la mezcla que disipa más energía es la fabricada con la combinación del betún modificado comercial (PMB 45/80-65) y fibras, seguido por la mezcla convencional AC 22 S B50/70. Las mezclas SMA fabricadas con polímeros reciclados por su parte, disipan menos energía acercándose a los niveles de la mezcla de altas prestaciones (AC 22 S MAP) y la mezcla convencional de 12 cm.

Así, analizando estos resultados de forma conjunta con las curvas mostradas en la Figura 149, se comprueba que la sustitución del betún convencional por los betunes modificados con polímeros permite retardar el consumo de energía bajo la aplicación de cargas, siendo este fenómeno responsable de la desaceleración en la pérdida de resistencia frente a la fisuración. De este modo, se prueba el efecto beneficioso del empleo de polímeros reciclados en la mejora estructural de este tipo de aplicaciones, ya que el aumento de la resistencia a la fisuración de la mezcla convencional AC 22 S B50/70 prueba estar ligado exclusivamente al aumento del espesor (siempre y cuando la mezcla se comporte como un conjunto sin fallas entre las distintas capas compactadas).

Aparte de estas consideraciones, hay que destacar que el empleo de betunes modificados en este caso, permite mejorar las prestaciones obtenidas por el betún modificado en refinería (PMB 45/80-65) en todo el rango de cargas aplicadas. Por ello, al potencial ahorro de costes y beneficios de carácter ambiental que supone el empleo de los polímeros reciclados, hay que sumar el notable incremento de la durabilidad de la infraestructura y la menor necesidad de mantenimiento de la misma.

5.4.2.5 Ensayo de punzonamiento para subbalasto bituminoso

Finalmente, y una vez comprobado que las mezclas tipo SMA fabricadas con polímeros reciclados cumplen con los requisitos mecánicos y estructurales exigibles al subbalasto bituminoso, es necesario evaluar el comportamiento de estas frente a uno de los principales problemas ligados a su durabilidad, el punzonamiento ocasionado por el balasto al que sirve de soporte. De esta forma, en la Figura 151 se encuentra representada la evolución de las distintas mezclas al ser sometidas al ensayo de punzonamiento acelerado a 40 °C.

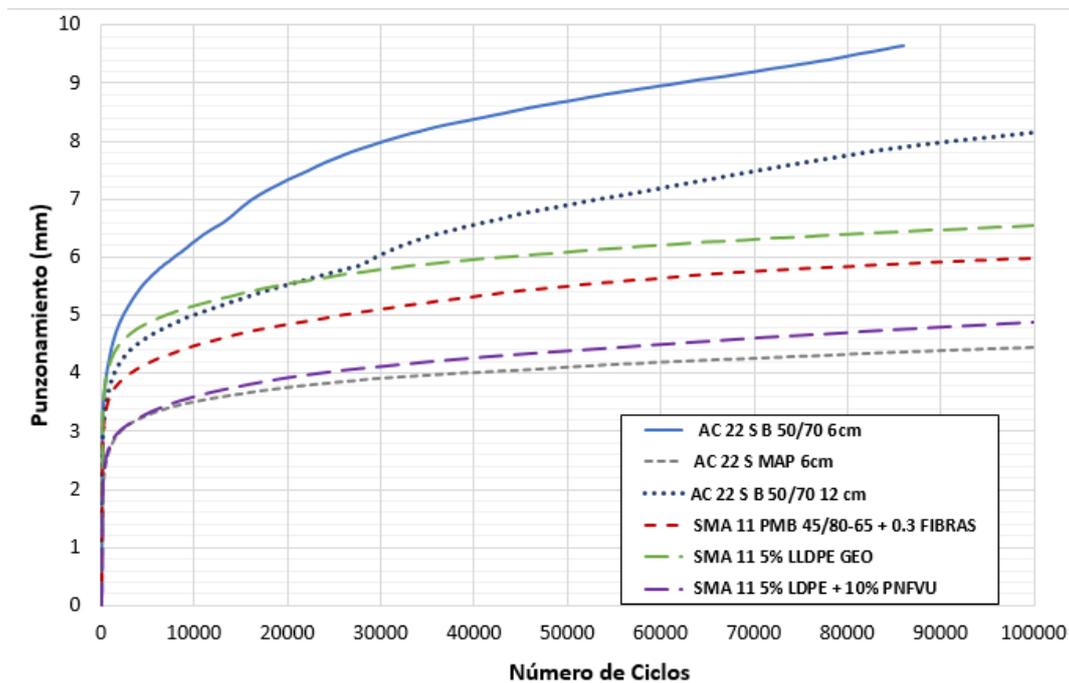


Figura 151. Evolución del punzonamiento de las distintas mezclas estudiadas.

Es posible observar como el empleo de las mezclas tipo SMA consigue reducir considerablemente el punzonamiento registrado para la mezcla de referencia (AC 22) fabricada con el betón convencional. De este modo, a igualdad de espesor, la mezcla fabricada con el polietileno procedente de geomembrana (SMA LDPE GEO) reduce la deformación final de la mezcla en un 32%, acercándose al 38% ofrecido por el betón modificado en refinería (SMA PMB 45/80-65 Fibras) y mejorando el comportamiento de la mezcla convencional (AC 22 B 50/70) para capas del doble de espesor (12 cm). A esto hay que sumar el hecho de que la mezcla de referencia, en su menor espesor (6 cm), alcanza el fallo límite (9.5 mm) establecido sin llegar a los 100000 ciclos fijados para el fin del ensayo con lo que las diferencias podrían resultar incluso mayores.

Mención aparte merece la mezcla SMA que incorpora la combinación de polietileno y caucho reciclados (LDPE + PNFVU), la cual reduce la deformación hasta en un 49% con respecto a la de referencia para un mismo espesor (6 cm) y un 40% respecto de la solución estándar de 12 cm. De este modo, muestra un comportamiento similar a la mezcla que incorpora el betún de altas prestaciones pese tener una rigidez un 41% menor a la de esta (Figura 147). Así, queda demostrando que, en lo referente al punzonamiento, el uso de polímeros reciclados en la mezcla SMA podría facilitar el empleo de la misma con espesores hasta un 50% menores que las soluciones convencionales.

Esto confirma la extensión de la resistencia a las deformaciones permanentes mostrada por esta mezcla cuando se estudiaba su empleo en firmes de carretera a otras aplicaciones de elevada exigencia como son las infraestructuras ferroviarias. Dicha resistencia es fruto de la combinación de la resistencia a las deformaciones permanentes aportada por la presencia del plastómero (la cual se puede apreciar claramente en la mejora obtenida por la mezcla SMA 11 LLDPE GEO) y la acción del caucho que aporta, además, una mayor recuperación elástica a las deformaciones inducidas.

Por otra parte, el estudio de las pendientes de estas curvas permite establecer índices de resistencia al punzonamiento a corto y largo plazo los cuales se encuentran representados en la Figura 152. Valores menores de estos parámetros son indicadores de una mayor resistencia al punzonamiento.

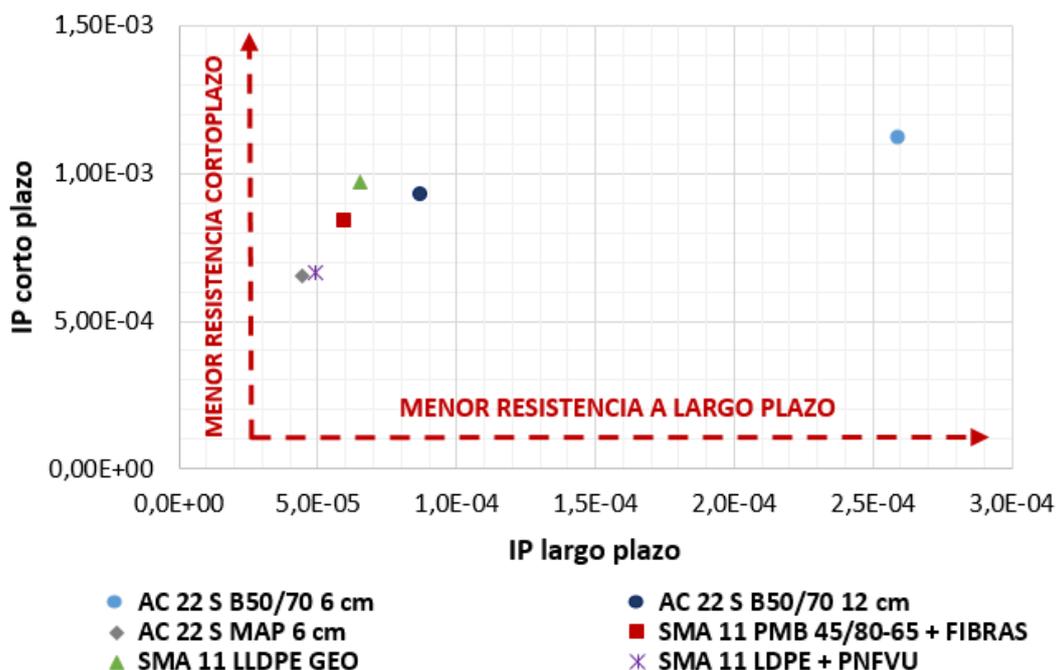


Figura 152. Índices de resistencia al punzonamiento a corto y largo plazo.

En primer lugar y si nos fijamos en el eje vertical, vemos como a corto plazo ya quedan de manifiesto las mejoras introducidas por el empleo de las mezclas tipo SMA con respecto a la mezcla AC 22 convencional (B 50/70) tanto para un mismo espesor (6 cm) como para la solución convencional de 12 cm.

En este sentido, la mezcla que incorpora LDPE + PNFVU muestra un índice de resistencia al punzonamiento análogo al de la mezcla que incorpora el betún de altas prestaciones (AC 22 MAP), demostrando que su empleo como subbalasto bituminoso cumple con todos los requisitos exigibles al mismo (al igual que la mezcla fabricada con polietileno procedente de geomembrana) y mejora las propiedades de la mezcla de referencia.

Dicha mejora es aún más evidente si analizamos la resistencia a largo plazo donde todas las mezclas de tipo SMA alcanzan una resistencia sustancialmente superior a la de la mezcla de referencia. De nuevo, la mezcla fabricada con la combinación de LDPE y PNFVU muestra un nivel de desempeño muy similar a la mezcla elaborada con betún modificado de altas prestaciones. Esto prueba que dichas mezclas no solo mejoran el comportamiento estructural de la infraestructura, sino que también muestran una durabilidad muy superior a la de las mezclas habitualmente empleadas, reduciendo así los posibles costes de mantenimiento y sustitución

En base a los resultados previamente descritos, se puede afirmar que el empleo de mezclas tipo SMA 11 con polímeros reciclados como subbalasto bituminoso en capas de 6 cm no solo cumplen con los requisitos exigibles a las mezclas comúnmente empleadas para tal fin, sino que mejoran en todos los aspectos (capacidad portante, resistencia a la acción del agua, deformaciones permanentes, fisuración y punzonamiento) las prestaciones de estas a igualdad de espesor. Su empleo como subbalasto permite, especialmente en el caso de la combinación entre polietileno y caucho reciclados (LLDPE + PNFVU) obtener unos niveles de desempeño a la altura de las mezclas que incorporan betunes de altas prestaciones especialmente diseñados para tal fin.

5.4.3 Aplicación mezclas con polímeros reciclados para la mejora estructural de infraestructuras portuarias

En este apartado se muestran los resultados relativos a la evaluación de los polímeros reciclados que mejores resultados ofrecieron en el estudio multiescalar para su uso como pavimento en infraestructuras portuarias.

5.4.3.1 Evaluación de la rigidez de las mezclas

En relación a la capacidad portante de las distintas mezclas estudiadas, en la Figura 153 se muestran los valores de rigidez promedio de las distintas mezclas a tres temperaturas diferentes. La primera conclusión clara que se puede observar es cómo para esta tipología de mezcla e independientemente del tipo de polímero y temperatura analizada, la presencia de polímeros reciclados incrementa la rigidez de la mezcla y, con ello su capacidad portante con respecto a la mezcla convencional (AC 22 S Ofita B50/70). Esto será de gran importancia ya que una de las principales funciones de estos pavimentos consiste en resistir elevadas cargas procedentes del almacenaje de mercancías.

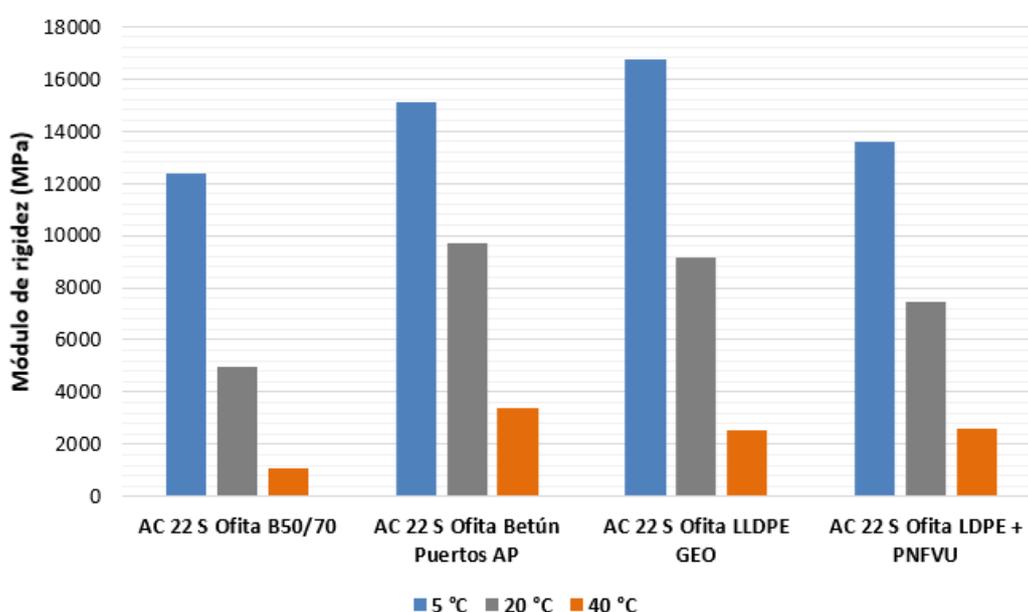


Figura 153. Módulo de rigidez promedio a distintas temperaturas de las mezclas empleadas como pavimento portuario.

Estableciendo una comparativa entre tipologías de betunes modificados, para la temperatura de 20 °C la rigidez obtenida por el betún de altas prestaciones (AC 22 S Ofita Betún Puertos AP) y el betún modificado con residuo de geomembrana (AC 22S Ofita LLDPE GEO) son muy similares entre sí y algo mayores a las del betún modificado con caucho (AC 22 S Ofita LDPE + PNFVU). De este modo, a través de la acción del polietileno y la presencia de fibras en este material se logra una capacidad portante muy similar a la obtenida mediante la adición de elevados contenidos de polímeros en la fabricación el betún modificado comercial.

A bajas temperaturas la rigidez del betún modificado con geomembrana es mucho más elevada mientras que a altas temperaturas se reduce ligeramente permaneciendo, no obstante, en el mismo orden de magnitud que el betún modificado comercial y la combinación con caucho (AC

22 S Ofita LDPE + PNFVU). Con todo ello, y en términos de capacidad portante, ambos betunes modificados muestran potencial para su empleo como parte de pavimentos portuarios.

5.4.3.2 Ensayo de Punzonamiento Estático UGR-PASpt (University of Granada- Port Asphalt Static Punching Test)

Otro factor clave a la hora de evaluar el desempeño específico de la mezcla bituminosas como pavimento portuario es la resistencia al punzonamiento estático. En la Figura 154 y la Figura 155 se muestran las curvas de fluencia de las distintas mezclas medidas durante el ensayo de punzonamiento estático aplicando una tensión de 2.6 y 5.2 MPa respectivamente. A partir de los resultados, se puede ver que para una tensión de 2.6 MPa (que simula la situación de apilamiento de un contenedor), aunque existen variaciones en relación a la mezcla con betún convencional, la diferencia entre los valores de las distintas mezclas modificadas es reducida, obteniendo en general similares resultados de deformación permanente y de tendencia a la fluencia (Figura 154).

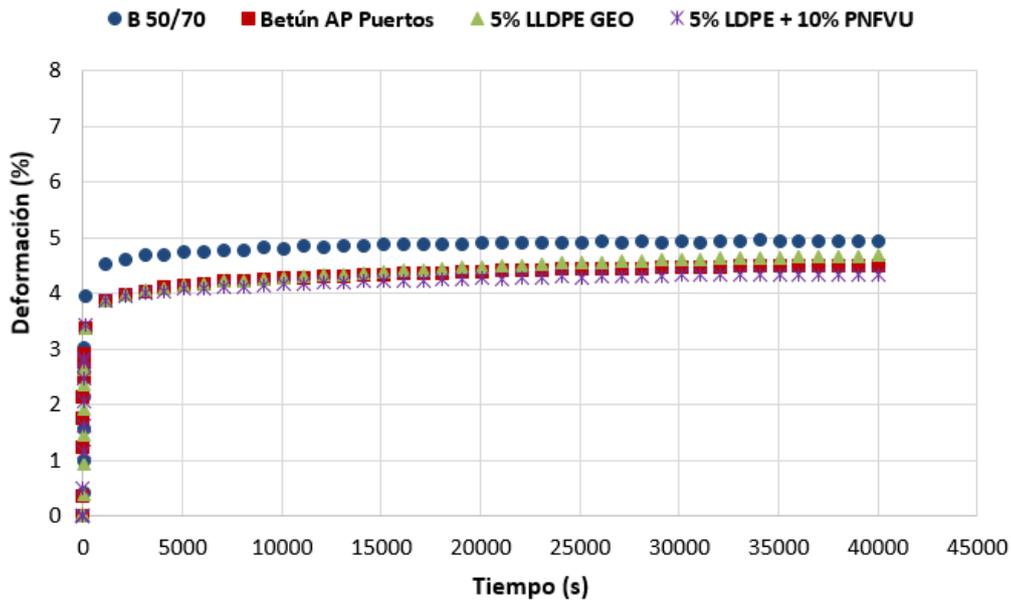


Figura 154. Evolución de la deformación para el punzonamiento estático a una presión de 2.6 MPa.

No obstante, en la Figura 155 puede apreciarse cómo al incrementar el nivel de tensión aplicado en la superficie de cada probeta (hasta 5.2 MPa, simulando así el apilamiento de entre dos y tres contenedores en vertical), las diferencias entre tipologías de mezcla se acentúan. Este hecho pone de manifiesto la influencia del tipo de betún en la resistencia a fluencia de las mezclas.

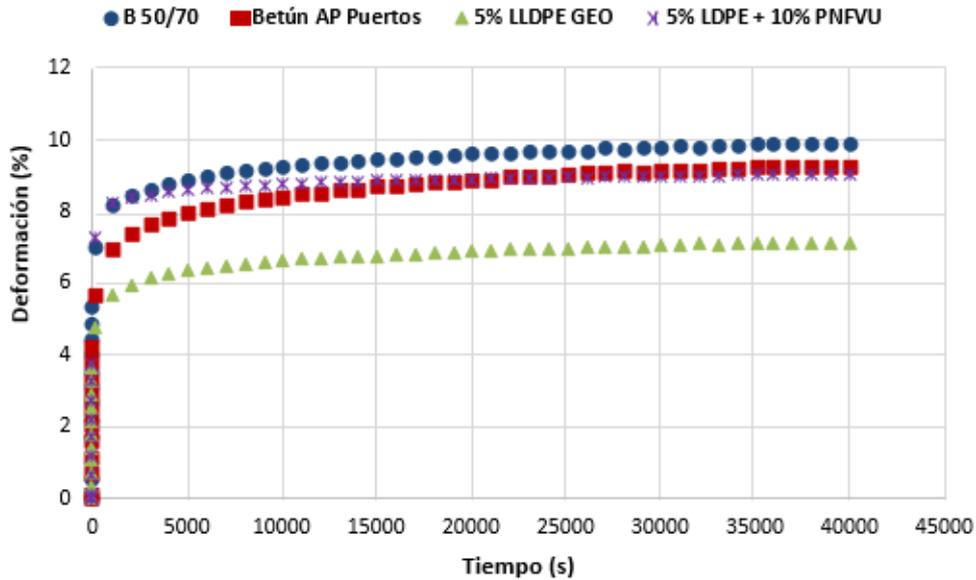


Figura 155. Evolución de la deformación para el punzonamiento estático a una presión de 5.2 MPa.

Se puede observar cómo la mezcla que incorpora la combinación de caucho y polietileno reciclados (LDPE + PNFVU) es capaz de alcanzar un grado de desempeño similar al del betún de altas prestaciones modificado en refinería (Betún AP Puertos) habitualmente empleado en este tipo de aplicación. En ambos casos se logra una reducción de deformación en relación al betún convencional.

Mención aparte merece el empleo del residuo de geomembrana en este tipo de pavimentos. Mientras que al nivel más bajo de carga su desempeño es similar al resto de soluciones, a medida que la carga crece, su mayor capacidad portante (Figura 153) y la aptitud de las fibras presentes en su composición para disipar tensiones aplicadas de manera estática se pone de manifiesto, logrando así una importante reducción de la deformación acumulada en el material (alrededor de un 2% en términos absolutos).



Figura 156. Aspecto de la mezcla tras su ensayo a punzonamiento estático.

Por otra parte, en la Figura 157 se encuentra representado el Límite de resistencia a punzonamiento estático (LRPE) para un nivel de deformación de referencia del 3%. De esta forma, es posible observar cómo la mezcla que comenzará antes a presentar deformaciones será la mezcla que incorpora el residuo de geomembrana (LDPE GEO). Sin embargo, tal y como queda presente en las curvas de fluencia, a partir de la aplicación de tensiones superiores a las correspondientes al apilamiento de un contenedor (2.6 MPa), su comportamiento será cada vez mejor en relación al resto de soluciones, constituyendo una opción interesante en puertos que requieran el almacenamiento de grandes cantidades de mercancías.

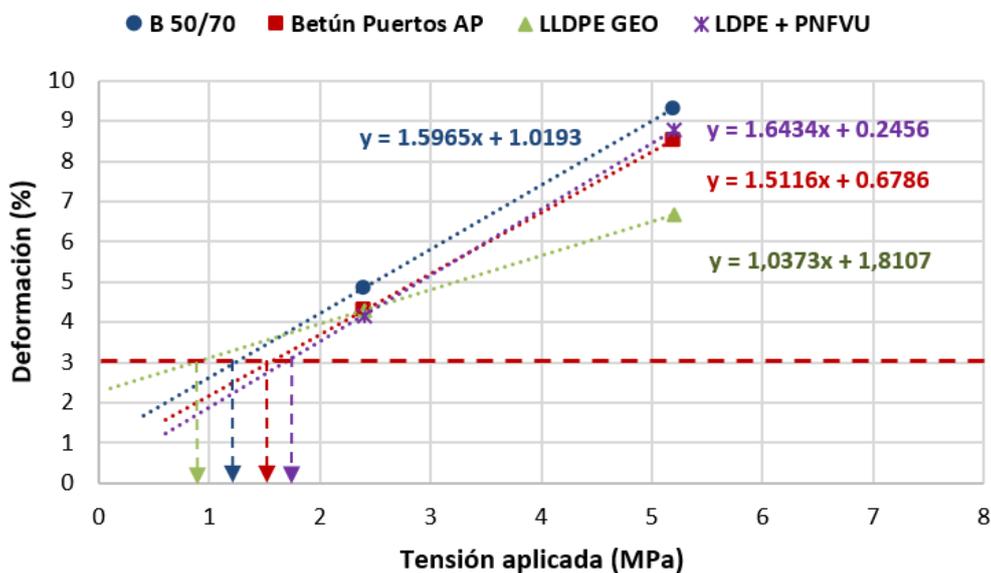


Figura 157. Límite de resistencia a punzonamiento estático (LRPE) de las distintas mezclas estudiadas.

En relación a la mezcla que combina polímeros reciclados (LDPE + PNFVU), el efecto combinado del polietileno y el caucho permite elevar la tensión requerida para que la mezcla comience a deformar. A partir de ahí, dicha mezcla presenta una tendencia similar a la del betún modificado comercial (Betún AP Puertos) en relación al aumento de la tensión aplicada, pero sin la deformación previa que supone la diferencia de comportamiento entre ambas.

Por último, la Figura 158 muestra la evolución de la velocidad de deformación del material en relación al aumento de carga aplicada, obteniendo de este modo el coeficiente de punzonamiento (η , obtenido de la relación entre tensión aplicada y velocidad de deformación registrada) de las distintas mezclas. El primer efecto claro de la adición de polímeros reciclados en las mezclas es el aumento del coeficiente de punzonamiento en relación a los valores de las mezclas que emplean betunes comerciales.

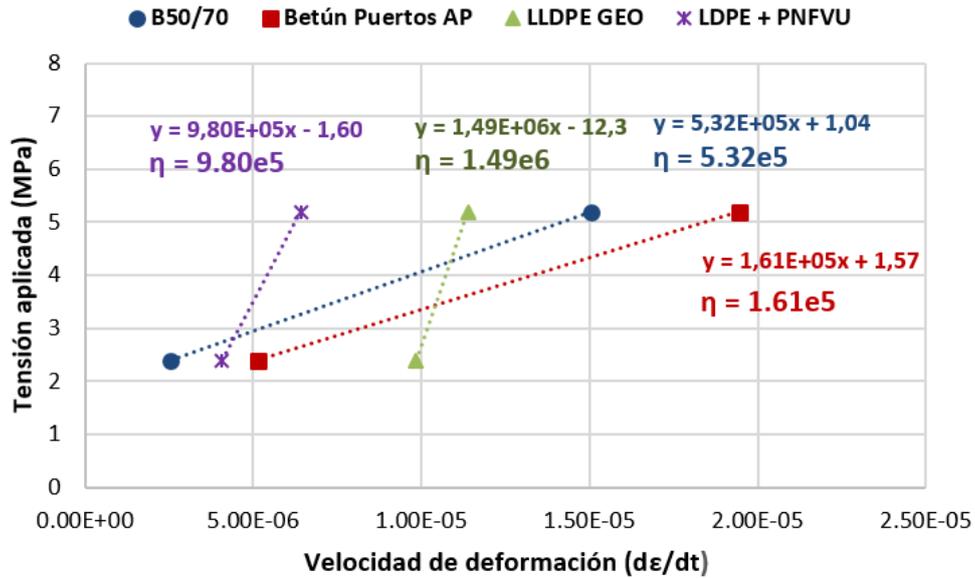


Figura 158. Coeficiente de punzonamiento de las distintas mezclas estudiadas.

Esto implica que, ante un aumento de la carga recibida (situación típica ante el crecimiento del tráfico en puertos), las mezclas modificadas con polímeros reciclados no solo alcanzaran unos niveles de deformación iguales o inferiores a los del betún modificado en refinería (Betún AP Puertos), si no que el ritmo al que dichas mezclas se deteriorarían sería menor. Esto garantiza una mayor durabilidad de las mismas (especialmente en el caso del betún modificado con geomembrana) y una mayor versatilidad de las mezclas ante un posible aumento de las cargas recibidas.

5.4.3.3 Ensayo de Impacto Dinámico UGR-PADpt (University of Granada – Port Asphalt Dynamic Punching Test)

Pasando a evaluar el segundo de los factores que influyen en el deterioro de los pavimentos portuarios, el punzonamiento dinámico debido a los impactos producidos durante la manipulación de mercancías, en la Figura 159 se puede observar la evolución de este parámetro para las distintas mezclas (expresado como porcentaje de deformación en relación a la altura inicial de la mezcla) cuando el ensayo se realiza a carga constante.

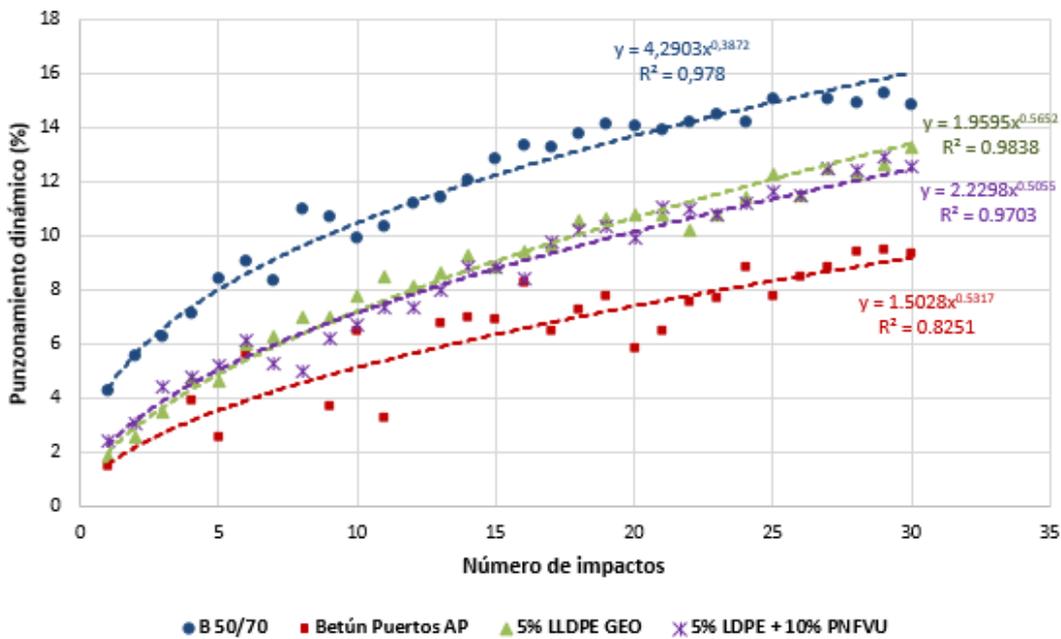


Figura 159. Evolución del punzonamiento dinámico a carga constante de las distintas mezclas.

En ella se puede observar que las mezclas que incorporan los polímeros reciclados, son capaces de reducir en torno a un 15% en el caso de la combinación de polietileno y polvo de neumático, y un 10% en el caso de la mezcla que incorpora el residuo de geomembrana con respecto a la que hace uso del betún convencional situándose así a medio camino entre esta solución y la que emplea el betún modificado de altas prestaciones.

Al igual que ocurría en el caso de la evaluación del comportamiento de la mezcla en términos de resistencia a las cargas producidas por el almacenamiento de mercancías, en este caso también puede darse la situación de que el potencial crecimiento del puerto de lugar a mayores solicitaciones a través de mayores alturas de caídas de objetos o mayores cargas de los mismos durante su manipulación. Por este motivo, en la Figura 160 se evalúa el efecto que tendría un aumento progresivo de las cargas de impacto dinámicas aplicadas.

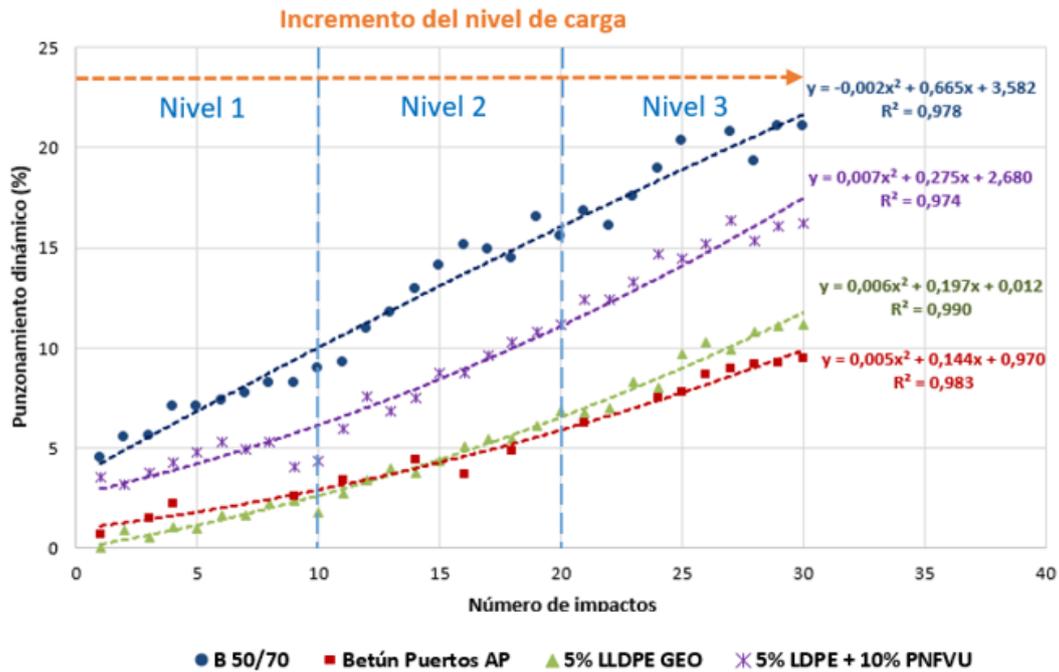


Figura 160. Evolución del punzonamiento dinámico a carga creciente de las distintas mezclas.

El aumento de cargas de manera creciente implica en primer lugar una reducción de la deformación final en un 27% en el caso de la combinación de polietileno y caucho reciclados (LDPE + PNFVU) y del 50% para el caso del residuo de geomembrana (LLDPE GEO) cuando se comparan con la mezcla convencional. En el caso del primero, aunque el grado en el que mejora el comportamiento de la mezcla convencional es mayor que para la aplicación de carga constante, la naturaleza de sus componentes no permite reducir la deformación en el mismo grado que la geomembrana.

La diferencia reside en los componentes del polímero encargados de reducir el grado de deformación. El caucho incrementa la recuperación elástica limitando el grado de deformación permanente, sin embargo, para que este efecto sea aprovechado completamente los resultados de fatiga (Figura 135) apuntan a que la naturaleza de las cargas, aunque dinámicas, debe tener cierta progresión (como el paso de los vehículos en carretera) mientras que aquí la aplicación es casi instantánea. Por este motivo, la capacidad de disipar tensiones a través de la red creada por las fibras presentes en la geomembrana es un método más efectivo que permite obtener un desempeño similar al de la mezcla fabricada con el betún modificado en refinería de alto módulo (Betún AP Puertos).



Figura 161. Aspecto de la muestra tras el ensayo de punzonamiento dinámico.

Finalmente, a partir de los datos obtenidos para los ensayos de impacto de carga constante y creciente, es posible establecer para un mismo nivel de deformación de referencia (10 %) la vida de punzonamiento dinámico (Nf) de las distintas mezclas como medida de su resistencia a este fenómeno. Así, en la Tabla 39 se puede observar que, mientras el betún modificado de referencia es más susceptible al aumento progresivo de la carga (reduciendo en un 16% su vida de punzonamiento), el betún combinación de polietileno y caucho es menos susceptible a este aumento. Por otra parte, y de manera similar a lo que ocurría en el caso del punzonamiento estático el aumento del nivel de carga contribuye a aprovechar al máximo la mayor capacidad portante y la capacidad de disipar tensiones del residuo de geomembrana incrementando su vida útil. De este modo, la tasa de deterioro de las mezclas modificadas con polímeros será menor que la de la mezcla modificada de referencia.

Tabla 39. Vida hasta punzonamiento dinámico (Nf) para las dos condiciones de ensayo.

Mezcla	Vida hasta punzonamiento dinámico (Nf) Carga constante	Vida hasta punzonamiento dinámico (Nf) Carga creciente
AC 22 S B50/70	8	11
AC 22 S B50/70 + 5% LLDPE GEO	17	26
AC 22 S B50/70 + 5% LDPE + 10% PNFVU	19	18
AC 22 S BETÓN PUERTOS AM	35	30

A tenor de los resultados de resistencia de las mezclas a los distintos tipos de fallo, se puede afirmar que el empleo de betunes modificados con polímeros reciclados es capaz de mejorar el comportamiento de pavimentos portuarios en cuanto a su resistencia al punzonamiento (estático y dinámico) en relación al betún convencional. Además, en el caso del residuo de geomembrana, este es capaz de alcanzar prestaciones similares a las de un betún modificado en

refinería de alto módulo mostrando, incluso, una menor susceptibilidad al incremento de cargas lo que lo convierte en un material más versátil y adaptable a posibles incrementos en la capacidad de almacenamiento y tratamiento de mercancías del puerto.

5.4.4 Evaluación global de las mezclas modificadas con polímeros reciclados para las distintas aplicaciones.

En este último apartado y a modo de resumen global del grado de aptitud de las mezclas modificadas con polímeros reciclados frente a las soluciones convencionales, en la Tabla 40 se establece una clasificación en función de los parámetros analizados para las distintas infraestructuras. Para cada parámetro, se asigna un valor en función del comportamiento de las mezclas en relación al resto. Así, a la mezcla con mejor comportamiento para una determinada propiedad se le asigna un valor de 1, mientras que la mezcla de peores prestaciones recibe un 4. En caso de similares prestaciones entre dos mezclas, ambas reciben el mismo valor.

Se puede observar cómo en el caso de mezclas empleadas en capas de rodadura de carreteras, en términos globales, las mezclas modificadas con polímeros reciclados no solo superan ampliamente las prestaciones del betún base de referencia, sino que también mejoran el comportamiento de la mezcla fabricada con la combinación de betún modificado en refinería y fibras (PMB 45/80-65), especialmente en el caso de la combinación de polietileno y caucho (LDPE +PNVU).

En cuanto al empleo como subbalasto, las mezclas con polímeros pese a ofrecer el mejor comportamiento frente al agua (LLDPE GEO) y muy buen comportamiento frente al punzonamiento (LDPE + PNFVU), no alcanzan las prestaciones del betún modificado con altas concentraciones de polímero. No obstante, la comparativa aquí debe entenderse en cuanto a la solución con betún convencional B50/70 de mayor espesor (12 cm) al ser esta la mezcla comúnmente empleada. En este sentido, ambas mezclas con betunes modificados con polímeros reciclados y 6 centímetros de espesor además de cumplir con los requisitos de este tipo de aplicación mejoran el comportamiento frente a la solución convencional de 12 cm, lo que permitiría reducir el consumo de materias primas al disminuir el espesor de capa a la vez que se incrementa la reutilización de este tipo de residuo.

En relación al empleo como pavimento portuario, la mezcla modificada con residuo de geomembrana es la que ofrece mejores prestaciones mejorando la solución que emplea el betún modificado en refinería cuyo desempeño es igualado por el empleo de LDPE +PNFVU.

De este modo, y en términos globales, se puede observar la notable mejora aportada por las mezclas modificadas con polímeros reciclados con respecto a las mezclas que incorporan el

Estudio de viabilidad del empleo de polímeros reciclados para la mejora estructural de infraestructuras de transporte

betún base. La versatilidad de estos materiales conduce a niveles de desempeño global que se aproximan al de los betunes modificados en refinería (para los cuales se empleó un ligante específico en cada tipo de aplicación) llegando a mejorar el comportamiento de estos en su empleo como capa de rodadura de altas prestaciones (LDPE + PNFVU) y pavimentos portuarios (LLDPE GEO).

Tabla 40. Clasificación del empleo de mezclas para las distintas infraestructuras.

Aplicación	Propiedad estudiada	Parámetro analizado	LLDPE GEO	LDPE + PNFVU	Betún Mod. Referen.	B 50/70 (Betún base)
SMA en capa de rodadura de carreteras	Sensibilidad al agua	% ITSR	1	3	2	4
	Capacidad portante	Módulo Rigidez 20 °C	1	2	4	3
	Resistencia a deformaciones permanentes	WTS (%)	3	1	2	4
	Escorrimento de ligante	Porcentaje escorrimento	2	1	1	4
	Resistencia a la fisuración a distinta Tª (UGR-FACT)	Ciclos hasta fallo	3	1	1	4
	Resistencia a la fisuración a distinta carga (UGR-FACT)	Ciclos hasta fallo	3	1	2	4
	Resistencia al envejecimiento (SATS)	% Módulo Retenido	1	2	3	4
PROMEDIO			2.00	1.57	2.14	3.86
SMA 11 subbalasto bituminoso (frente AC 22 B50/70 12 cm y AC 22 betún altas prestaciones)	Sensibilidad al agua	% ITSR	1	3	2	4
	Capacidad portante	Módulo Rigidez 20 °C	2	3	1	4
	Resistencia a deformaciones permanentes (Triaxial)	Deformación y relación fluencia	2	3	1	4
	Resistencia a la fisuración (UGR-FACT)	Ciclos hasta fallo	4	3	2	1
	Resistencia al punzonamiento	Deformación	3	2	1	4
		IP corto plazo	3	1	1	4
		IP largo plazo	3	2	1	4
PROMEDIO			2.57	2.43	1.29	3.57
AC 22 S empleada como pavimento portuario	Capacidad portante	Módulo Rigidez 20 °C	1	3	2	4
	Punzonamiento estático	Deformación 2.6 Mpa	3	1	2	4
		Deformación 5.2 Mpa	1	2	3	4
		Coefficiente Punzonamiento	1	2	4	3
	Punzonamiento por impacto dinámico	Vida Punzonam. Carga Constante	3	2	1	4
		Vida Punzonam. Carga Creciente	2	3	1	4
PROMEDIO			1.83	2.17	2.17	3.83
PROMEDIO GLOBAL			2.13	2.06	1.87	3.75

5.5 Análisis estructural, costes y consumo de polímeros reciclados

En este último apartado del análisis de resultados se presenta la aplicación de las mezclas modificadas con polímeros reciclados estudiadas a un caso de dimensionamiento estructural, así como la evaluación de los costes comparativos que suponen su empleo y el potencial consumo de polímeros vinculado al mismo. Todo ello, con el objetivo de garantizar en el mayor grado posible la aplicabilidad de este tipo de soluciones.

5.5.1 Análisis estructural

En este primer apartado, se incluye la comparativa entre los modelos de dimensionamiento estructural definidos en el capítulo de Metodología correspondientes al empleo de tres mezclas: una SMA 16 fabricada con el betún B50/70 base, la misma SMA 16 empleando el ligante modificado con residuo de geomembrana (LLDPE GEO) y, por último, la SMA 11 que combina el empleo de polietileno de origen doméstico y el polvo de neumático (LDPE + PNFVU). Los módulos elásticos (E) empleados como datos de entrada en el modelo de dimensionamiento fueron obtenidos a partir de la caracterización del módulo de rigidez de las mezclas:

Tabla 41. Módulo de elasticidad de las distintas mezclas empleado en la modelización.

Mezcla evaluada	Módulo de elasticidad, E (MPa)
SMA 16 B50/70	5092.67
SMA 16 B50/70 + 5% LLDPE GEO	6393.64
SMA 16 B50/70 + 5% LDPE + 10% PNFVU	5885.51

El primer paso para establecer la comparativa estructural fue la evaluación de la deformación horizontal de tracción obtenida en el fondo del paquete firme. En la Figura 162 se muestran los niveles de deformación alcanzados por las distintas soluciones en función del software empleado. Se puede observar como la diferencia entre las dos aplicaciones empleadas en la evaluación de los modelos se sitúa en torno al 4%. Más allá de esto, se comprueba que, en términos del análisis comparativo de dimensionamiento, la diferencia de rigideces entre materiales es el factor más significativo a la hora de establecer la comparativa. De este modo, la mezcla con mayor capacidad portante (SMA LLDPE) logra reducir la deformación de tracción en un 7 % en relación a la mezcla que combina LDPE + PNFVU (la cual es menos rígida) y en un 11.6% con respecto a la mezcla fabricada con el betún base B 50/70.

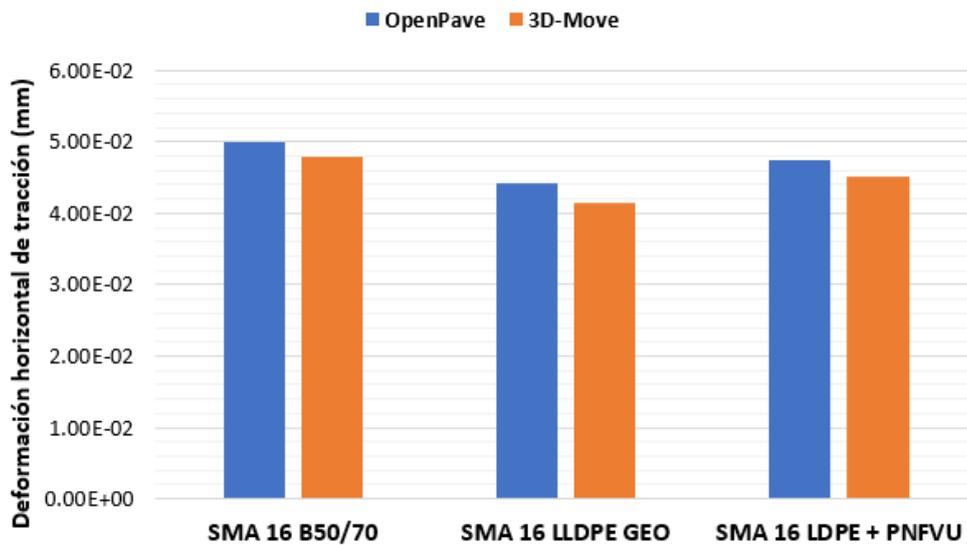


Figura 162. Comparativa entre las deformaciones a tracción en la capa inferior de la mezcla proporcionadas por los dos programas empleados.

Tras obtener los datos de deformación para los distintos modelos, el siguiente paso consistió en la evaluación de cómo dicha deformación evolucionaría a lo largo del tiempo condicionando la vida útil de las distintas mezclas. Para ello, se hizo uso de las leyes de fatiga de las distintas mezclas obtenidas a través de los datos del análisis UGR-FACT a distintas condiciones de carga y temperatura:

Tabla 42. Leyes empleadas en el cálculo de la resistencia del paquete de firme.

Mezcla evaluada	Ley de fatiga del material
SMA 16 B50/70	$N_f = 1.2232 \times \delta_h^{-2.779}$
SMA 16 B50/70 + 5% LLDPE GEO	$N_f = 3.8790 \times \delta_h^{-2.663}$
SMA 16 B50/70 + 5% LDPE + 10% PNFVU	$N_f = 0.0602 \times \delta_h^{-4.170}$

A través de la aplicación de dichas leyes de fatiga, se puede evaluar de manera más precisa la capacidad estructural de los distintos modelos considerados en el dimensionamiento, ya que la ley de fatiga tiene en cuenta, no solo la capacidad estructural en términos de rigidez, sino el comportamiento a largo plazo del material a través de su resistencia a fisuración. Este último es un factor de gran importancia en la durabilidad de las mezclas bituminosas y depende de elementos adicionales como la capacidad de disipación de energía del material. De este modo, en la Figura 163 se muestran para los dos programas, la diferencia entre la vida útil de las mezclas aplicadas a este modelo estructural.

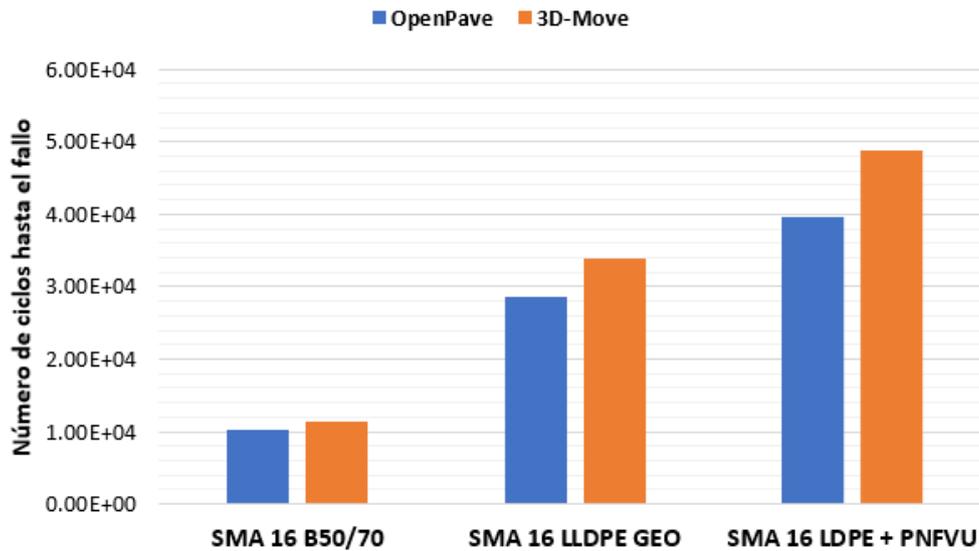


Figura 163. Comparativa entre el número de ciclos hasta fallo en función del programa empleado.

Es posible observar cómo, una vez se aplican los datos de la vida de fatiga del material, la mezcla con mayor vida útil tras el comienzo de la fisuración en el fondo del paquete de firme no sería ya la mezcla modificada con polietileno procedente de geomembrana (LLDPE GEO) sino que sería la mezcla que combina el empleo de polietileno y caucho reciclados (LDPE + PNFVU). Esta presentaría un incremento de durabilidad del 292 % en relación a la mezcla de referencia y un 38.4 % mayor que la mezcla con polietileno procedente de geomembrana (esta última un 183% mejor que la mezcla con betún B50/70). Todo ello confirma la necesidad de la consideración de la vida de fatiga del material para la realización de cualquier tipo de análisis de dimensionamiento, empleando datos basados en la caracterización a largo plazo de los materiales en laboratorio con ensayos como el UGR-FACT.

En cuanto las variaciones entre software, estas son la traslación de las diferencias entre esfuerzos y deformaciones registrados para los diferentes modelos, maximizadas por las diferencias entre las leyes de fatiga de los distintos materiales. Aunque en el caso de estudios comparativos como este sea posible emplear cualquiera de los programas (ya que las diferencias se producen en términos relativos), de cara a estudiar un modelo concreto y la posible variación de espesores para el mismo sería aconsejable emplear el software con menores diferencias entre la vida útil de los materiales, de manera que las reducciones sean fijadas dentro de un margen de seguridad.

Una vez establecido que la mezcla de menor durabilidad es la mezcla que emplea el betún base B 50/70, se procedió a determinar el grado de deformación que cada una de las otras dos mezclas deberían alcanzar para obtener la misma vida útil que esta. Para ello en la Figura 164 y

la Figura 165 se muestra la evolución de la deformación de las mezclas LLDPE GEO y LDPE + PNFVU respectivamente, a medida que se reduce el espesor de ambas hasta alcanzar la deformación equivalente a la vida útil de la mezcla de referencia (SMA 16 B 50/70) según la ley de fatiga de las dos mezclas evaluadas.

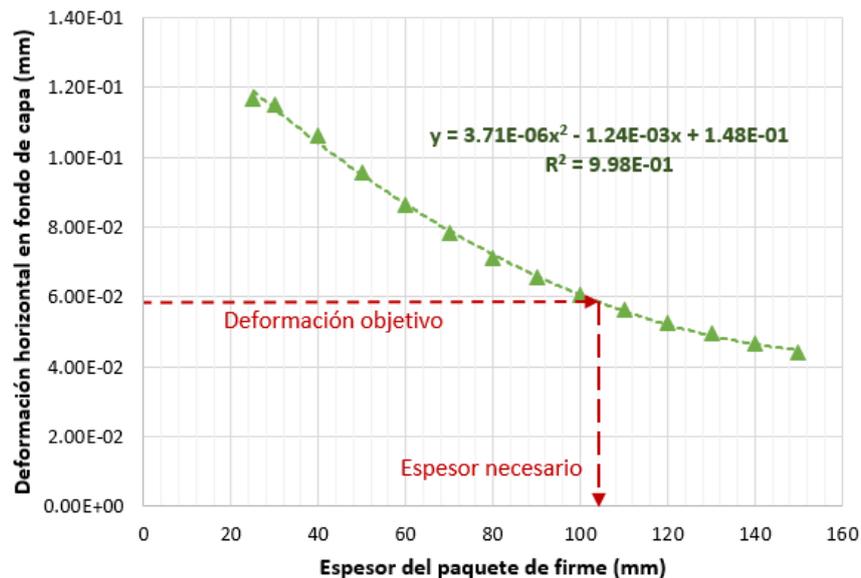


Figura 164. Reducción del espesor del paquete de firme para la mezcla con geomembrana reciclada.

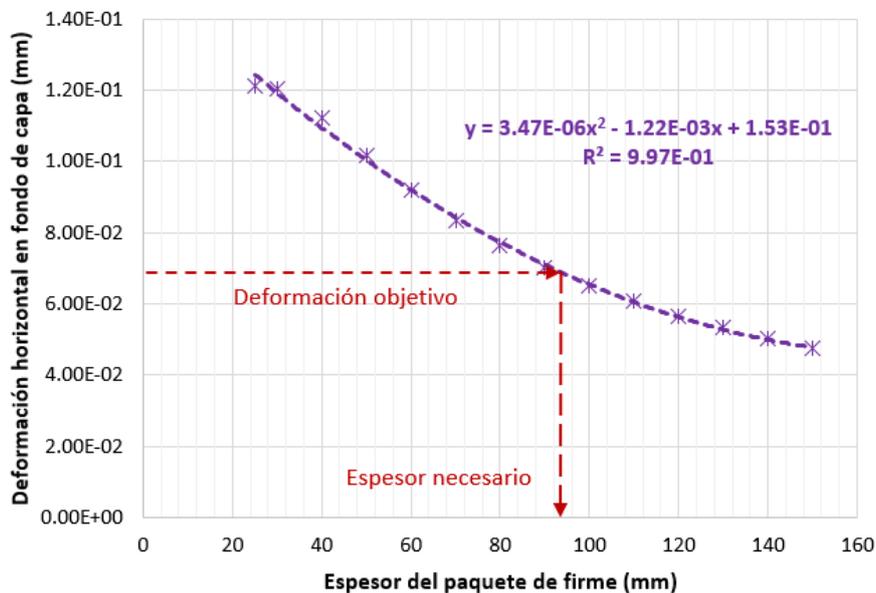


Figura 165. Reducción del espesor del paquete de firme para la mezcla con combinación de polietileno y caucho reciclados.

De este modo es posible comprobar como en el caso de la mezcla que emplea el residuo de geomembrana, se puede obtener la misma vida útil que la mezcla convencional para un espesor de paquete de firme de 114.2 mm lo que supondría una reducción de espesor de unos 3.5 cm

de firme. En el caso de la combinación de polietileno y polvo de neumático (LDPE + PNFVU), la reducción sería aún mayor hasta un espesor de paquete de firme necesario de 93.3 mm lo que daría lugar a una potencial reducción de unos 5.5 cm.

Este ejemplo de dimensionamiento basado en datos de caracterización mecánica del comportamiento de mezclas demuestra el elevado potencial del empleo de mezclas modificadas con polímeros reciclados para la mejora estructural de infraestructuras de transporte. Junto a este tipo de análisis deben considerarse el resto de datos incluidos en esta tesis doctoral, los cuales evalúan el comportamiento de los materiales frente a los distintos modos de fallo presentes en las principales infraestructuras y la evolución de su comportamiento ante fenómenos como el envejecimiento.

5.5.2 Análisis de costes

Una vez probada la capacidad mecánica y estructural de las mezclas que incorporan los distintos polímeros reciclados estudiados en esta tesis y comprobar que, en relación con las soluciones estándar habitualmente empleadas (en forma del betún base y del betún modificado de referencia), son capaces de mostrar características similares e incluso superiores en muchos aspectos a los de estas, es necesario también considerar a la hora de evaluar una nueva solución los aspectos económicos y medioambientales que esta implica.

En este caso, la vertiente económica es de especial interés ya que como se ha referido en el Capítulo 2, uno de los principales motivos que limitan la aplicación de mezclas bituminosas con polímeros es el sobrecoste vinculado a los ligantes que los incorporan. La mayoría de análisis de diseño empleados hoy día se centran principalmente en la inversión inicial necesaria a la hora de afrontar la construcción de una determinada infraestructura de transporte, dejando fuera factores tan importantes como la vida de servicio de la misma o la necesidad de actuaciones de mantenimiento durante la misma.

De este modo, pese a la repercusión positiva que el empleo de ligantes modificados con polímeros tiene en la vida útil de las mezclas y en la disminución de la frecuencia en las tareas de mantenimiento, su elevada inversión inicial las limita, por ejemplo, a cifras próximas al 7.5% de la red total de carretas a nivel europeo (Nicodème et al., 2017). En otras palabras, únicamente las vías principales, autovías y autopistas (que cuentan con una mayor inversión) tienen acceso a este tipo de soluciones pese a concentrar el resto de vías la mayoría de los desplazamientos.

Por este motivo, en esta tesis se realizó una comparativa de costes, en términos de inversión inicial de fabricación y puesta en obra de las distintas mezclas previamente descritas y

evaluadas. En este sentido, se decidió evaluar el coste que supondrían las mezclas que incorporan los tres tipos de polímero estudiado (LDPE, LLDPE GEO y LDPE + PNFVU), ya que, puesto que suponen una mejora con respecto del betún base, sus diferentes propiedades permiten su empleo en distintos tipos de aplicaciones y niveles de exigencia. De este modo, aparte de las ventajas mecánicas y medioambientales introducidas por el empleo de polímeros reciclados se puede evaluar si su uso implica algún tipo de ventaja económica que limite los inconvenientes de los betunes modificados en refinería y permita extender su empleo a un mayor número de infraestructuras. En la Tabla 43 se muestra el coste final de fabricación y puesta en obra de las distintas mezclas estudiadas:

Tabla 43. Comparativa de coste final de fabricación y puesta en obra de las distintas mezclas.

Tipo de mezcla	Coste final (€/Tn)
SMA 11 B 50/70	42.80
SMA 11 B 50/70 + 5% LDPE	43.72
SMA 11 B 50/70 + 5% LLDPE GEO	43.99
SMA 11 B 50/70 + 5% LDPE + 10% PNFVU	45.41
SMA 11 PMB 45/80-65	48.33
SMA 11 PMB 45/80-65 + 0.3% FIBRAS	52.23

Se puede apreciar de manera clara que, cuando comparamos el coste de las distintas mezclas, en efecto el empleo de materiales reciclados supone un ahorro significativo en el precio final por tonelada de mezcla puesta en obra. De este modo, tomando las dos mezclas de mejores prestaciones, la fabricada con la combinación de polietileno y polvo de caucho reciclados y la fabricada empleando el betún modificado en refinería y las fibras, se observa como el empleo de los materiales reciclados supone un ahorro final en el coste de la mezcla del 13 %.

Por otra parte, si se considera la comparación con la mezcla que incorpora el betún convencional, las mezclas que añaden polietileno a su composición suponen un sobrecoste menor al 3%. De esta forma, un pequeño aumento en el coste inicial de la mezcla (en el mayor de los casos llegaría al 6%) supone una mejora sustancial de las propiedades mecánicas y la capacidad estructural de la mezcla tal y como se ha visto, en términos de resistencia a deformaciones permanentes y a la acción del agua, mejora de la capacidad portante, reducción del escurrimiento del ligante y mejora de la resistencia a la fatiga y al envejecimiento. Con todo

ello, dicho sobrecoste es asumible desde el punto de vista de la durabilidad de la mezcla y la menor necesidad de actuaciones de mantenimiento, todo ello sin renunciar a una importante reducción de inversión inicial al comparar con una mezcla modificada convencional que permita extender el empleo de estas soluciones a un mayor número de vías (carreteras secundarias, vías urbanas, etc.)

Analizando la distribución de estos costes, si analizamos los correspondientes a la fabricación, se comprueba que la mayor reducción se produce, tal y como se esperaba, en el coste del ligante modificado. Como ejemplo, en la Figura 166 se comparan los costes de fabricación de la mezcla que incorpora el ligante modificado con residuo de geomembrana y la mezcla fabricada con el betún modificado en refinería de referencia al ser dos mezclas que incorporan, por una parte un polímero y, por otra, la presencia de fibras en su composición (en el caso del residuo de geomembrana como parte del mismo). De este modo, se puede comprobar como tal y como se exponía durante el estudio del estado del arte, la parte que incrementa de manera más significativa el coste de la mezcla es el mayor precio del ligante modificado.

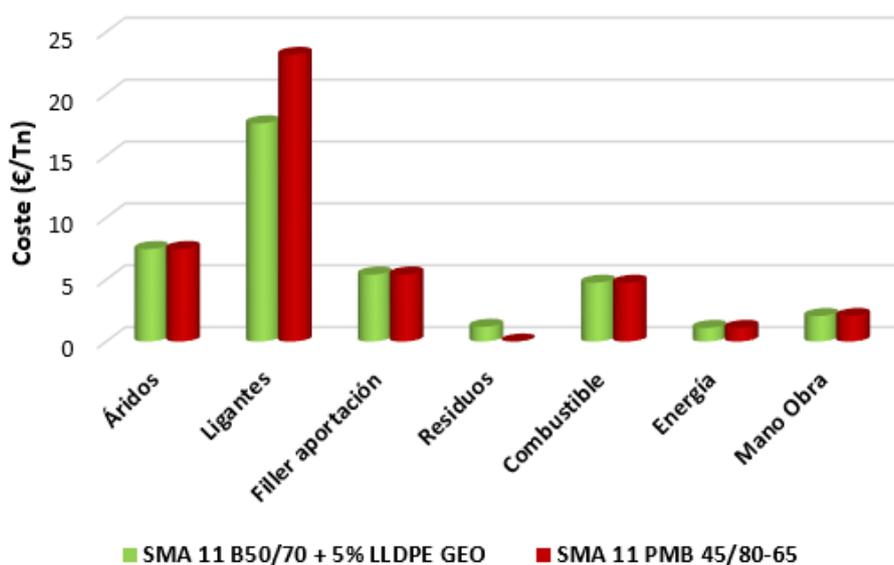


Figura 166. Comparativa costes producción entre mezcla con polímero reciclado y mezcla con betún modificado en refinería.

De este modo y habiendo mantenido unas condiciones de modificación y de fabricación de la mezcla al introducir los polímeros reciclados que no requieren grandes modificaciones en planta (no se ha aumentado la temperatura del ligante, ni se necesitarían métodos de agitación especiales o tiempos de digestión superiores a los empleados en el calentamiento habitual del betún), el coste de los polímeros reciclados no alcanza el sobrecoste entre el betún base (B50/70) y el betún modificado (PMB 45/80-65).

El empleo de polímeros reciclados como los estudiados en esta tesis, tanto de uso doméstico (con una importante red de reciclaje ya establecida) como los residuos de geomembrana o caucho, cuentan con una elevada disponibilidad. Esto junto con la necesidad de un tratamiento previo mínimo (basado en una simple trituración o corte para el polietileno) o técnicamente bien desarrollado (en el caso del caucho) implica un coste del polímero bastante bajo (en torno a los 365-475 € por tonelada para el polietileno y unos 330 €/Tn para el polvo de neumático). De este modo, mediante el empleo del material reciclado se logra reducir el coste de fabricación de la mezcla, reduciendo la inversión inicial de la misma y extendiendo su empleo a actuaciones que cuentan con un presupuesto menor como vías urbanas, convencional o secundarias, zonas de parking y de carga en puertos o aeropuertos o distintas tareas de refuerzo, mejorando la capacidad estructural de cualquiera de ellas y alargando su vida útil.

Siguiendo el razonamiento previo, si comparamos la distribución porcentual de los costes, en la Figura 167 se puede observar al comparar los costes de las dos mezclas de mejores prestaciones, cómo el peso que supone en el coste global el ligante modificado en refinería pasa de un 49 % a un 43 %. Esto no es únicamente significativo de la reducción en el precio del ligante, sino que además al suponer este un menor porcentaje con respecto al total de las materias primas, el precio final de la mezcla no se verá tan afectado por un material que por su origen como derivado del petróleo (también lo son los polímeros tipo SBS empleados en la modificación) siempre se verá sujeto a mayores fluctuaciones y a una tendencia alcista por lo limitado de esta materia prima en el futuro.

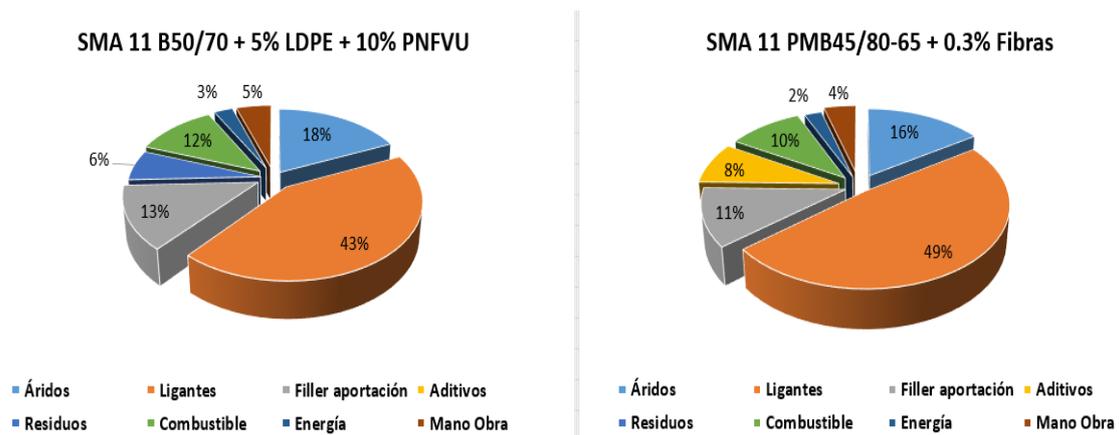


Figura 167. Distribución porcentual comparativa de los costes de fabricación.

Por su parte, el peso que supone el empleo de materiales reciclados, constituye un elemento más estable que aquellos que proceden de materiales vírgenes y su precio, en todo caso, puede reducirse en un futuro al incrementarse la oferta y mejorarse los sistemas de gestión y

tratamiento de residuos. En este sentido, la aparición de usos alternativos como los planteados en esta tesis doctoral suponen un acicate hacia una mayor inversión en mejorar los sistemas de recogida y reciclaje y la consecuente reducción de los costes de producción de los mismos.

Más allá de la consideración de los costes iniciales de inversión, se ha comprobado a través de un análisis de dimensionamiento cómo el empleo de las mezclas que incorporan polímeros reciclados son capaces de reducir el espesor de capa de firme necesario para un mismo desempeño estructural. De esta forma, si consideramos las tres mezclas analizadas en el modelo de dimensionamiento estructural se puede obtener a partir del coste de las distintas soluciones (Tabla 43) y su densidad (Tabla 9) una estimación real del coste de la infraestructura considerando su desempeño estructural para una misma vida útil:

Tabla 44. Coste final de las mezclas estudiadas en el dimensionamiento para una misma vida útil.

Tipo de mezcla	Coste final (€/m ²)
SMA 11 B 50/70 (15 cm)	17.31
SMA 11 B 50/70 + 5% LDPE GEO (11.5 cm)	14.19
SMA 11 B 50/70 + 5% LLDPE + 10 % PNFVU (9.5 cm)	11.25

Es posible observar cómo una vez se consideran los materiales a igualdad de vida útil, la mayor capacidad estructural de las mezclas que incorporan los polímeros reciclados se pone de manifiesto. De esta forma, el aumento de inversión inicial de entre el 3 y el 6 % que suponía el empleo de este tipo de soluciones con respecto a la mezcla fabricada con betún convencional (B 50/70) se traduce ahora en un aumento equivalente del coste de la mezcla convencional del 22% con respecto a la mezcla con geomembrana y del 53.8% si se considera la mezcla combinación de polietileno y polvo de neumático reciclados.

Queda así probada la necesidad de evaluar el empleo de mezclas que incorporen nuevas tecnologías y materiales en términos relativos al desempeño que estas tendrán durante toda su vida útil, de manera que se puedan precisar las ventajas económicas a largo plazo de su aplicación.

5.5.3 Análisis de consumo de polímeros reciclados

Junto a al ahorro económico en la inversión inicial a realizar y la prolongación de la vida útil que supone el empleo de mezclas con polímeros reciclados (la cual permite preservar en mayor grado dicha inversión y reducir la necesidad de tareas de mantenimiento), no se puede olvidar la vertiente medioambiental del empleo de este tipo de materiales.

Tal y como se ha referido en el estudio del estado del arte, existe una elevada problemática relacionada con el creciente consumo de plásticos y el residuo que generan de modo que soluciones como las planteadas en esta tesis pueden servir para reducir la problemática generada por este material. Sirva como ejemplo el empleo de mezclas bituminosas como las previamente descritas en carreteras convencionales (dado que la reducción de la inversión inicial y la mejora de las propiedades mecánicas lo permiten).

El empleo de mezclas tipo SMA 11 incorporando polímeros reciclados como los aquí estudiados siguiendo la dosificación planteada (5.3% betún por peso de mezcla; 5% LDPE y 10 % PNFVU por peso de ligante) y su aplicación en capa de rodadura para una sección tipo, permitiría la incorporación de hasta 2.1 toneladas de polietileno (LDPE o LLDPE) por kilómetro de firme y hasta 4.2 toneladas de polvo de neumático al final de su vida útil (PNFVU). Escalando estas cifras a una red de vías secundarias y convencionales como la española (Nicodème et al., 2017) se alcanzan unos consumos potenciales de 1.6 millones de toneladas de polietileno y hasta 3.2 millones de toneladas de PNFVU.

De este modo, se contribuye a incrementar el porcentaje de reciclaje de este tipo de polímeros (al contar con un nuevo mercado de aplicación) contribuyendo a reducir el porcentaje del 27.2 % de plásticos que aún hoy día acaban depositados en vertederos (Plastics Europe. Association of Plastics Manufactures, 2018) o suponen una importante amenaza de tipo medioambiental como la relativa al estado actual de los océanos (según un informe de Greenpeace (Greenpeace España, 2016) 8 millones de plásticos acaban en los mares y océanos anualmente).

Conclusiones

Conclusions

6. Conclusiones

La presente tesis doctoral se centra en el estudio de la viabilidad del empleo de polímeros reciclados para la mejora estructural de mezclas bituminosas empleadas en infraestructuras de transporte. Durante el desarrollo de la misma se profundizó en el estudio de la interacción entre polímeros y betún analizando la escalabilidad de los efectos observados a nivel de mortero y mezcla bituminosas. De igual modo, y tras analizar la posibilidad de aplicar los polímeros por distintas vías (vía húmeda y vía seca), se evaluaron las propiedades mecánicas a largo plazo de las mezclas que los incorporan cuando estas son aplicadas en la mejora estructural de distintas infraestructuras de transporte, así como las implicaciones económicas y ambientales de su empleo. Con todo ello, se logra aportar mayores garantías al uso de dichos materiales permitiendo extender su empleo a un mayor número de vías e infraestructuras. Las principales conclusiones obtenidas son:

- De la revisión bibliográfica se extrae que, por su versatilidad, características mecánicas, estabilidad, coste y disponibilidad el polietileno es uno de los polímeros reciclados con mayor potencial para su uso en mezclas bituminosas. El empleo de nuevas fuentes como las geomembranas empleadas en impermeabilización pueden, además, aportar las ventajas asociadas al empleo de fibras presentes en el material como refuerzo. Por otra parte, la combinación con el caucho presente en el PNFVU incrementa la componente elástica del betún resultante acercando sus propiedades a los betunes modificados comerciales.
- Los resultados obtenidos de la interacción entre ligante y polímeros reciclados garantizan la estabilidad de los ligantes modificados, fijando el contenido óptimo de polietileno en un 5% por peso de ligante. De igual modo, el análisis de la microestructura del betún prueba la adecuada distribución e interacción entre los distintos componentes (polietileno, fibras y caucho) y el betún dando lugar a una menor susceptibilidad a las tensiones transmitidas por el paso del tráfico y a las condiciones ambientales (envejecimiento y susceptibilidad térmica) en relación a los betunes de referencia.
- A nivel de ligante, el empleo de polietileno (con y sin la adición de fibras) logran mejorar las propiedades del ligante base especialmente en lo referente a la resistencia a la deformación a altas temperaturas, aunque sin llegar al nivel del betún modificado de referencia, cuya durabilidad llega incluso a ser superada por el ligante combinado con PNFVU.

- Los resultados de rigidez, comportamiento viscoelástico, susceptibilidad al agua y resistencia a las deformaciones plásticas y a la fatiga muestran que las propiedades observadas a nivel de ligante son escalables tanto a nivel de mortero como para la mezcla asfáltica en su conjunto, permitiendo precisar las propiedades observadas a nivel de ligante a medida que se produce la interacción con el resto de componentes, mejorando así la comprensión acerca del mecanismo de acción de los polímeros.
- En relación con lo anterior, el empleo de polietileno da lugar a una mayor capacidad portante, resistencia a las deformaciones y mejor comportamiento a fatiga a todas las temperaturas en relación al ligante base. La combinación con fibras a través del residuo de geomembrana o con PNFVU permite alcanzar, además, prestaciones iguales o superiores al betún modificado de referencia en términos de susceptibilidad al agua o resistencia a las deformaciones y a la fatiga respectivamente garantizando su aplicabilidad en distintas condiciones de sollicitación.
- En cuanto al método óptimo de adición, los resultados de trabajabilidad y resistencia a la tracción indican una mejor interacción entre el polímero reciclado (LDPE) y el resto de componentes de la mezcla cuando este es incorporado previamente al betún (vía húmeda).
- La incorporación de polímeros reciclados a los pavimentos de carreteras permite mejorar la durabilidad de las mismas a través de una mayor resistencia al envejecimiento y un mejor comportamiento mecánico a largo plazo frente a sus principales motivos de fallo. Dichas mejoras incluso superan las mezclas de altas prestaciones empleadas actualmente en términos de fisuración y resistencia a deformaciones permanentes (LDPE + PNVU) así como en susceptibilidad al agua y capacidad portante (LLDPE GEO).
- El empleo como subbalasto bituminoso de las mezclas SMA fabricadas con betunes modificados con polímeros reciclados, además de cumplir con los requisitos de este tipo de aplicación, mejoran el comportamiento frente a la solución convencional (AC 22S B50/70) de mayor espesor, especialmente en términos de susceptibilidad al agua (AC 22 S LLDPE GEO) y resistencia al punzonamiento (AC 22 S LDPE + PNFVU). Esto dota a las mezclas de una mayor durabilidad a largo plazo y permite reducir el consumo de materias primas al disminuir el espesor de capa.
- La mezcla modificada con polímeros procedentes de geomembranas permite la obtención de mezclas versátiles de elevada capacidad portante capaces de resistir las sollicitaciones vinculadas al almacenamiento y manipulación de mercancías en pavimentos portuarios,

mejorando la solución que emplea el betún modificado en refinería cuyas prestaciones son similares a las obtenidas mediante el empleo de LDPE +PNFVU.

- El análisis económico de las mezclas con polímeros reciclados demuestra el ahorro que estas suponen (en torno al 13%) desde el punto de vista de la inversión inicial cuando se compara con un betún modificado en refinería. Esto sumado a la disminución de acciones de mantenimiento derivada de su mayor durabilidad y a la potencial reducción de espesor (entre un 24 y un 38%), permite extender su ámbito de aplicación a un mayor número de infraestructuras.
- Desde el punto de vista del consumo de polímeros, el empleo de estos materiales en vías convencionales permitiría la reutilización potencial de alrededor de 2.1 toneladas de polietileno y en torno a 4.2 toneladas de PNFVU por kilómetro según el diseño estudiado, lo que contribuiría a incrementar el porcentaje de reciclaje efectivo de estos materiales.
- Considerando las mejoras estructurales obtenidas mediante el empleo de polímeros reciclados en distintas aplicaciones y tras quedar probada la durabilidad de los mismos y los beneficios de tipo económico y ambiental que suponen, la presente tesis demuestra la viabilidad del uso de polímeros reciclados para la mejora estructural de infraestructuras de transporte proporcionando mayores garantías relativas a su empleo y facilitando así la extensión de su aplicación a un mayor número de vías e infraestructuras.

Futuras Líneas de Investigación

Future Lines of Research

7. Futuras líneas de investigación

Durante el desarrollo de la presente tesis doctoral, en la que se ha estudiado la viabilidad del empleo de distintos polímeros reciclados para la mejora estructural de materiales bituminosos, han surgido diversas líneas de investigación que son susceptibles de ser exploradas en futuros estudios con el fin de ampliar el conocimiento acerca del modo en el que la incorporación de polímeros reciclados puede mejorar estructuralmente el desempeño de las infraestructuras de transporte.

En este sentido, se proponen distintas líneas de estudio en relación con el trabajo presentado en esta tesis doctoral:

- Tal y como se ha presentado, el residuo de mayor disponibilidad de entre los estudiados es el polietileno procedente del reciclaje de plásticos de uso doméstico. Por ello, es interesante el estudio de la combinación de residuos tipo LDPE de consumo doméstico como los estudiados, con fibras de origen reciclado (como por ejemplo fibras de polipropileno) como forma alternativa de alcanzar el efecto del residuo de geomembrana.
- Una vez probada la estabilidad al almacenamiento de la combinación de polímeros, el siguiente paso es facilitar lo máximo posible la aplicación en planta de estos materiales. Para ello se plantea el estudio de nuevas formas de integración entre el LDPE y el PNFVU que faciliten la aplicación conjunta en planta sin la necesidad de dos silos independientes y sin que esto suponga un coste superior derivado de la integración de ambos materiales. Del mismo modo, se debe proseguir en la investigación de nuevos polímeros de creciente empleo como los de tipo PLA empleados en técnicas de impresión 3D.
- De igual modo se plantea profundizar en el estudio de la aplicación de los polímeros reciclados por vía seca, estableciendo nuevos sistemas de incorporación e interacción con el resto de componentes que mejoran la trabajabilidad y propiedades mecánicas de estas mezclas a largo plazo (evaluando su envejecimiento).
- Si bien en la presente tesis doctoral se ha estudiado el empleo de los polímeros reciclados a mezclas de tipo SMA 11, resulta interesante el estudio de dicho polímero en otras mezclas bituminosas de altas prestaciones tales como las de tipo BBTM o PA analizando para estas

las diferencias con las mezclas habitualmente empleadas y las diferencias de comportamiento obtenidas al analizar distintos espesores de capa.

- La reutilización de mezclas bituminosas al final de su vida útil mediante su fresado y empleo como RAP en altas tasas es un fenómeno cada vez más extendido. Por ello, es interesante explorar las implicaciones del empleo de polímeros reciclados en la reutilización del material fresado una vez agotada la vida de servicio del firme.
- Tras recoger en esta tesis las ventajas de tipo económico a nivel de fabricación y puesta en obra de las mezclas bituminosas que incorporan polímeros reciclados y presentar los beneficios ambientales, en futuros trabajos se plantea completar el análisis de ciclo de vida del empleo de estos materiales como forma de precisar las ventajas ambientales y económicas al incluir el proceso de reciclaje del material, emisiones y el ahorro de materias primas derivado del empleo de los mismos.
- Una vez probadas las ventajas de carácter mecánico y estructural del empleo de polímeros reciclados en mezclas asfálticas a nivel de laboratorio, el siguiente paso lógico es la aplicación en tramos experimentales de las mezclas desarrolladas a nivel de carretera, subbalasto bituminoso o pavimentos portuarios de manera que se correlacionen los resultados a largo plazo de laboratorio con el desempeño real de las mezclas.
- Tras probar la capacidad de las mezclas tipo SMA 11 fabricadas con polímeros reciclados para su empleo como subbalasto bituminoso, ampliar el empleo de dichas mezclas comparando con distintos espesores de la mezcla convencional tipo AC 22 estableciendo posibles ahorros de material en caso de ser capaces de mantener una capacidad estructural similar o superior a las de estas.
- Una vez evaluado el empleo de mezclas con polímeros reciclados en el ámbito portuario, es interesante para el empleo en este tipo de actuaciones o las que se podrían derivar del uso en aeropuertos, la evaluación de la resistencia de este tipo de materiales a la acción de combustibles.
- Tras aplicar los datos de la caracterización de las mezclas bituminosas al análisis de dimensionamiento, se plantea la aplicación del mismo a un mayor número de casos tanto a

nivel de carreteras, infraestructuras ferroviarias, puertos y aeropuertos, evaluando la posible reducción de espesores en virtud de la mejora estructural aportada.

Bibliografía

Bibliography

8. Referencias bibliográficas

Abd-Allah, A. M., El-Sharkawi Attia, M. I., Abd-Elmaksoud Khamis, M. F., & Deef-Allah, E. M. M. (2014). Effect of using polymers on bituminous mixtures characteristics in egypt. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 11, 54-63.

Abdel-Goad, M. A. (2006). Waste polyvinyl chloride-modified bitumen. *Journal of Applied Polymer Science*, 101(3), 1501-1505.

Abtahi, S. M., Sheikhzadeh, M., & Hejazi, S. M. (2010). Fiber-reinforced asphalt-concrete—a review. *Construction and Building Materials*, 24(6), 871-877.

Adhikari, B., De, D., & Maiti, S. (2000). Reclamation and recycling of waste rubber. *Progress in Polymer Science*, 25(7), 909-948.

Administrador Infraestructuras Ferroviarias (ADIF). (2011). Pliego general de prescripciones técnicas tipo para los proyectos de plataforma (PGP) Centro publicaciones ADIF.

Aguiar-Moya, J. P., Salazar-Delgado, J., Bonilla-Mora, V., Rodríguez-Castro, E., Leiva-Villacorta, F., & Loría-Salazar, L. (2015). Morphological analysis of bitumen phases using atomic force microscopy. *Road Materials and Pavement Design*, 16(sup1), 138-152.

Ahmadinia, E., Zargar, M., Karim, M. R., Abdelaziz, M., & Ahmadinia, E. (2012). Performance evaluation of utilization of waste polyethylene terephthalate (PET) in stone mastic asphalt. *Construction and Building Materials*, 36, 984-989.

Ahmed, H. Y., Othman, A. M., & Mahmoud, A. A. (2006). Effect of using waste cement dust as a mineral filler on the mechanical properties of hot mix asphalt. *Ass.Univ.Bull.Environ.Res*, 9(1), 51-60.

Ahmedzade, P., Demirelli, K., Günay, T., Biryani, F., & Alqudah, O. (2015). Effects of waste polypropylene additive on the properties of bituminous binder. *Procedia Manufacturing*, 2, 165-170.

Ahmedzade, P., Fainleib, A., Günay, T., & Grygoryeva, O. (2014). Modification of bitumen by electron beam irradiated recycled low density polyethylene. *Construction and Building Materials*, 69, 1-9.

Airey, G. D. (2003a). Rheological properties of styrene butadiene styrene polymer modified road bitumens. *Fuel*, 82(14), 1709-1719.

Airey, G. D. (2003b). State of the art report on ageing test methods for bituminous pavement materials. *International Journal of Pavement Engineering*, 4(3), 165-176.

Al-Abdul Wahhab, H. I., Dalhat, M. A., & Habib, M. A. (2017). Storage stability and high-temperature performance of asphalt binder modified with recycled plastic. *Road Materials and Pavement Design*, 18(5), 1117-1134.

Alataş, T., & Yilmaz, M. (2013). Effects of different polymers on mechanical properties of bituminous binders and hot mixtures. *Construction and Building Materials*, 42, 161-167.

Al-Hadidy, A. I., & Yi-qiu, T. (2007). New technical method for production homogenous and storage stable polymer modified asphalt. Paper presented at the *Proceedings of the 7th International Conference of Chinese Transportation Professionals (ICCTP 2007)*, May, 21-22.

Al-Hadidy, A. I., & Yi-qiu, T. (2009). Effect of polyethylene on life of flexible pavements. *Construction and Building Materials*, 23(3), 1456-1464.

Al-Hadidy, A. I., & Yi-Qiu, T. (2009). Mechanistic approach for polypropylene-modified flexible pavements. *Materials & Design*, 30(4), 1133-1140.

Ali, A. H., Mashaan, N. S., & Karim, M. R. (2013). Investigations of physical and rheological properties of aged rubberised bitumen. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2013

Amari, T., Themelis, N. J., & Wernick, I. K. (1999). Resource recovery from used rubber tires. *Resources Policy*, 25(3), 179-188.

Amin, M., Khan, M., & Saleem, M. (2016). Performance evaluation of asphalt modified with municipal wastes for sustainable pavement construction. *Sustainability*, 8(10), 949.

Androjić, I., & Kaluđer, G. (2017). Influence of recycled filler on asphalt mix properties. *Građevinar*, 69(03.), 207-214.

Angelone, S., Casaux, M. C., Borghi, M., & Martinez, F. O. (2016). Green pavements: Reuse of plastic waste in asphalt mixtures. *Materials and Structures*, 49(5), 1655-1665.

Attaelmanan, M., Feng, C. P., & Al-Hadidy, A. I. (2011). Laboratory evaluation of HMA with high density polyethylene as a modifier. *Construction and Building Materials*, 25(5), 2764-2770.

Bala, N., Kamaruddin, I., & Napiah, M. (2017). The influence of polymer on rheological and thermo oxidative aging properties of modified bitumen binders. *Jurnal Teknologi*, 79(6)

Baumgardner, G. L., Masson, J. F., Hardee, J. R., Menapace, A. M., & Williams, A. G. (2005). Polyphosphoric acid modified asphalt: Proposed mechanisms. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 74, 283-305.

Becker, Y., Mendez, M. P., & Rodríguez, Y. (2001). Polymer modified asphalt. Paper presented at the *Vision Tecnologica*,

Behl, A., Sharma, G., & Kumar, G. (2014). A sustainable approach: Utilization of waste PVC in asphaltting of roads. *Construction and Building Materials*, 54, 113-117.

Bermejo-Muñoz, J. M., Gallego-Medina, J., & Saiz-Rodríguez, L. (2014). Guía para la fabricación de betunes con polvo de neumático. *Madrid: Signus Ecovalor*.

Branco, C., & Franco, V. T. (2008). A unified method for the analysis of nonlinear viscoelasticity and fatigue cracking of asphalt mixtures using the dynamic mechanical analyzer (Vol. 70, No. 02).

Brasileiro, L., Moreno-Navarro, F., Tauste, R., Sol-Sánchez, M., Matos, J., & Rubio-Gámez, M. C. (2019). Study of the feasibility of producing modified asphalt bitumens using flakes made from recycled polymers. *Construction and Building Materials*, 208, 269-282.

Brasileiro, L., Moreno-Navarro, F., Tauste-Martínez, R., Matos, J., & Rubio-Gámez, M. d. C. (2019). Reclaimed polymers as asphalt binder modifiers for more sustainable roads: A review. *Sustainability*, 11(3), 646.

Brovelli, C., Crispino, M., Pais, J., & Pereira, P. (2015). Using polymers to improve the rutting resistance of asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 77, 117-123.

Brûlé, B., Brion, Y., & Tanguy, A. (1988). (1988). Paving asphalt polymer blends: Relationships between composition, structure and properties (with discussion). Paper presented at the *Association of Asphalt Paving Technologists Proc*, 57

Butz, T., Nölting, M., & Arnold, J. (2010). Binder and asphalt designs for heavy duty pavements case studies. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 1(3), IV. Retrieved from <https://search.proquest.com/docview/212032007>

Cannone-Falchetto, A., Alisov, A., Goeke, M., & Wistuba, M. P. (2016). Identification of structural changes in bitumen due to aging and fatigue. *6th Eurasphalt & Eurobitume Congress Prague, Czech Republic*.

Cao, W. (2007). Study on properties of recycled tire rubber modified asphalt mixtures using dry process. *Construction and Building Materials*, 21(5), 1011-1015.

Cardona, D. R., Di Benedetto, H., Sauzeat, C., Calon, N., & Saussine, G. (2016). Use of a bituminous mixture layer in high-speed line trackbeds. *Construction and Building Materials*, 125, 398-407.

Casey, D., McNally, C., Gibney, A., & Gilchrist, M. D. (2008). Development of a recycled polymer modified binder for use in stone mastic asphalt. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(10), 1167-1174.

Cavalcanti De Sousa, P. (2010). Automated Protocol for the Analysis of Dynamic Mechanical Analyzer Data from Fine Aggregate Asphalt Mixes (Doctoral dissertation).

Celauro, B., Celauro, C., Presti, D. L., & Bevilacqua, A. (2012). Definition of a laboratory optimization protocol for road bitumen improved with recycled tire rubber. *Construction and Building Materials*, 37, 562-572.

CENIT. (2005). *Estudio sobre la viabilidad de incorporar capas de sub-balasto con material bituminoso en las líneas de alta velocidad en españa-fase 2* Conf. Report.

Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, (CEDEX). (2007). Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas.

Chávez-Valencia, L. E., & Hernández-Barriga, C. (2009). Estado del arte y perspectiva del envejecimiento de los pavimentos asfálticos. *Acta Universitaria*, 19(1), 30-39.

Chehovits, J. D., Dunning, R. L., & Morris, G. E. (1982). Characteristics of asphalt-rubber by the sliding plate microviscometer. Paper presented at the *Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists*, 51 240-261.

Chen, J., & Lin, K. (2005). Mechanism and behavior of bitumen strength reinforcement using fibers. *Journal of Materials Science*, 40(1), 87-95.

Chen, M., Lin, J., & Wu, S. (2011). Potential of recycled fine aggregates powder as filler in asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 25(10), 3909-3914.

Chen, M., Lin, J., Wu, S., & Liu, C. (2011). Utilization of recycled brick powder as alternative filler in asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 25(4), 1532-1536.

Cheung, C. Y., & Cebon, D. (1997). Experimental study of pure bitumens in tension, compression, and shear. *Journal of Rheology*, 41(1), 45-74.

Chiu, C., & Lu, L. (2007). A laboratory study on stone matrix asphalt using ground tire rubber. *Construction and Building Materials*, 21(5), 1027-1033.

Clark, C., Meardon, K., & Russell, D. (1993). *Scrap tire technology and markets* William Andrew Inc.

Colucci, B., Colucci, A. J., Prieto, E. J. V., & Dayton, D. (1994). Feasibility of using crumb rubber modifier in hot mix asphalt pavement applications in puerto rico. *Puerto Rico Transportation Technology Transfer Center. University of Puerto Rico, Mayaguez, Puerto Rico*,

Cong, P., Xun, P., Xing, M., & Chen, S. (2013). Investigation of asphalt binder containing various crumb rubbers and asphalts. *Construction and Building Materials*, 40, 632-641.

Cortes, C., Perez, A., Feroso, J., Costa, A., Guisado, F., Esquena, J., & POTTI, J. J. (2010). Envejecimiento fotooxidativo de betunes asfálticos. *Comunicaciones Libres De La V Jornada Nacional De ASEFMA*,

Cortizo, M. S., Larsen, D. O., Bianchetto, H., & Alessandrini, J. L. (2004). *Effect of the thermal degradation of SBS copolymers during the ageing of modified asphalts* doi://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2004.05.006

Costa, L., Fernandes, S., Silva, H., & Oliveira, J. (2017). Study of the interaction between asphalt and recycled plastics in new polymer modified binders (PMB). *Ciência & Tecnologia Dos Materiais*, 29(1), e19-e197.

Costa, A., Loma, J., Hidalgo, M. E., Hergueta, J. A., Sánchez, F., Lanchas, S., & Potti, J. J. (2014). Mezclas SMA (stone mastic asphalt), sostenibles y medioambientalmente amigables. *Comunicación*, 8.

Cuadri, A. A., García-Morales, M., Navarro, F. J., & Partal, P. (2014). Effect of transesterification degree and post-treatment on the in-service performance of NCO-functionalized vegetable oil bituminous products. *Chemical Engineering Science*, 111, 126-134.

Cuadri, A. A., & Martín-Alfonso, J. E. (2017). The effect of thermal and thermo-oxidative degradation conditions on rheological, chemical and thermal properties of HDPE. *Polymer Degradation and Stability*, 141, 11-18.

Cuadri, A. A., Roman, C., Garcia-Morales, M., Guisado, F., Moreno, E., & Partal, P. (2016). Formulation and processing of recycled-low-density-polyethylene-modified bitumen emulsions for reduced-temperature asphalt technologies. *Chemical Engineering Science*, 156, 197-205.

D'Angelo, J., Kluttz, R., Dongre, R. N., Stephens, K., & Zanzotto, L. (2007). Revision of the superpave high temperature binder specification: The multiple stress creep recovery test (with discussion). *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 76

Das, P. K., Baaj, H., Tighe, S., & Kringos, N. (2016). Atomic force microscopy to investigate asphalt binders: A state-of-the-art review. *Road Materials and Pavement Design*, 17(3), 693-718.

Dalhat, M. A., & Wahhab, H. A. (2015). Sulfur extended heavy oil fly ash and cement waste asphalt mastic for roofing and waterproofing. *Materials and Structures*, 48(1-2), 205-216.

Dehouche, N., Kaci, M., & Mokhtar, K. A. (2012). Influence of thermo-oxidative aging on chemical composition and physical properties of polymer modified bitumens. *Construction and Building Materials*, 26(1), 350-356.

Del Barco-Carrión, A. J., García-Travé, G., Moreno-Navarro, F., Martínez-Montes, G., & Rubio-Gámez, M. C. (2016). Comparison of the effect of recycled crumb rubber and polymer concentration on the performance of binders for asphalt mixtures. *Materiales De Construcción*, 66(323), 090.

Dessouky, S., Ilias, M., Park, D., & Kim, I. T. (2015). Influence of antioxidant-enhanced polymers in bitumen rheology and bituminous concrete mixtures mechanical performance. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015

Diab, A., & You, Z. (2017). Small and large strain rheological characterizations of polymer-and crumb rubber-modified asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 144, 168-177.

Ding, X., Ma, T., Zhang, W., & Zhang, D. (2017). Experimental study of stable crumb rubber asphalt and asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 157, 975-981.

Dirección General de Carreteras. Ministerio de Fomento. (2015). *Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes (PG-3)* Centro de Publicaciones, Ministerio de Fomento.

Earnest, M. D. (2015). Performance characteristics of polyethylene terephthalate (PET) modified asphalt.

Edwards, Y., Tasdemir, Y., & Isacson, U. (2006). Rheological effects of commercial waxes and polyphosphoric acid in bitumen 160/220—low temperature performance. *Fuel*, 85(7-8), 989-997.

El-Rahman, A. A., El-Shafie, M., Mohammedy, M. M., & Abo-Shanab, Z. L. (2017). Enhancing the performance of blown asphalt binder using waste EVA copolymer (WEVA). *Egyptian Journal of Petroleum*,

Ergun, M., Iyınam, S., & Iyınam, A. F. (2005). (2005). Flexural behavior of waste plastic added asphalt concrete mixture. Paper presented at the *2005 International Symposium on Pavement Recycling*,

Eurobitume and the Asphalt Institute. (2015). *The bitumen industry – A global perspective: Production, chemistry, use, specification and occupational exposure, 3rd edn.* (). Retrieved from https://www.eurobitume.eu/public_downloads/General/The%20Bitumen%20Industry%203rd%20edition.pdf

European Asphalt Pavement Association. (2017). *Asphalt in figures 2017*. Brussels, Belgium: Retrieved from <https://eapa.org/eapa-asphalt-in-figures-2017/>

European Tyre & Rubber Manufactures Association. (2017). *Industry statistics. edition 2017*. Belgium: European Tyre & Rubber Manufactures Association.

Fang, C., Liu, X., Yu, R., Liu, P., & Lei, W. (2014). Preparation and properties of asphalt modified with a composite composed of waste package poly (vinyl chloride) and organic montmorillonite. *Journal of Materials Science & Technology*, 30(12), 1304-1310.

Fang, C., Wu, C., Hu, J., Yu, R., Zhang, Z., Nie, L., Mi, X. (2014). Pavement properties of asphalt modified with packaging-waste polyethylene. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 20(1), 31-35.

Farahani, H., Palassi, M., & Galooyak, S. (2018). Rheology investigation of waste LDPE and crumb rubber modified bitumen. *Engineering Solid Mechanics*, 6(1), 27-38.

Fernandes, S., Costa, L., Silva, H., & Oliveira, J. (2017). Effect of incorporating different waste materials in bitumen. *Ciência & Tecnologia Dos Materiais*, 29(1), e20-e209.

Ferrão, P., Ribeiro, P., & Silva, P. (2008). A management system for end-of-life tyres: A portuguese case study. *Waste Management*, 28(3), 604-614.

Fiksel, J., Bakshi, B. R., Baral, A., Guerra, E., & DeQuervain, B. (2011). Comparative life cycle assessment of beneficial applications for scrap tires. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 13(1), 19-35.

Fraternali, F., Ciancia, V., Chechile, R., Rizzano, G., Feo, L., & Incarnato, L. (2011). Experimental study of the thermo-mechanical properties of recycled PET fiber-reinforced concrete. *Composite Structures*, 93(9), 2368-2374.

Gama, D. A., Júnior, J. M. R., De Melo, Tomas Jeferson Alves, & Rodrigues, J. K. G. (2016). Rheological studies of asphalt modified with elastomeric polymer. *Construction and Building Materials*, 106, 290-295.

Garcia-Morales, M., Partal, P., Navarro, F. J., & Gallegos, C. (2006). Effect of waste polymer addition on the rheology of modified bitumen. *Fuel*, 85(7-8), 936-943.

García-Travé, G., Tauste, R., Moreno-Navarro, F., Sol-Sánchez, M., & Rubio-Gámez, M. C. (2016). Use of reclaimed geomembranes for modification of mechanical performance of bituminous binders. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(7), 04016021.

Gaskin, J. (2013). *On bitumen microstructure and the effects of crack healing*. (Doctoral dissertation, University of Nottingham)

Gawel, I., & Baginska, K. (2004). Effect of chemical nature on the susceptibility of asphalt to aging. *Petroleum Science and Technology*, 22(9-10), 1261-1271.

Ge, D., Yan, K., You, Z., & Xu, H. (2016). Modification mechanism of asphalt binder with waste tire rubber and recycled polyethylene. *Construction and Building Materials*, 126, 66-76. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.09.014

Ghavibazoo, A., Abdelrahman, M., & Ragab, M. (2015). Evaluation of oxidization of crumb Rubber–Modified asphalt during short-term aging. *Transportation Research Record*, 2505(1), 84-91.

Giavarini, C., De Filippis, P., Santarelli, M. L., & Scarsella, M. (1996). Production of stable polypropylene-modified bitumens. *Fuel*, 75(6), 681-686.

Gibreil, H. A., & Feng, C. P. (2017). Effects of high-density polyethylene and crumb rubber powder as modifiers on properties of hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 142, 101-108.

Gil, S., & Caldeiro, A. (2012). Betunes modificados con polietileno reciclado, procedente del contenedor amarillo, estables al almacenamiento, VII Jornada Nacional de Asefma, Madrid, Spain.

Gogalipur, A. (2011). Modification of Multiple Stress Creep and Recovery test procedure and usage in specification. Master Thesis, University of Wisconsin, Madison.

Gogoi, R., Biligiri, K. P., & Das, N. C. (2016). Performance prediction analyses of styrene-butadiene rubber and crumb rubber materials in asphalt road applications. *Materials and Structures*, 49(9), 3479-3493.

Greenpeace España. (2016). Plásticos en los océanos. Datos, comparativa e impactos. España.

Gürü, M., Çubuk, M. K., Arslan, D., Farzanian, S. A., & Bilici, I. (2014). An approach to the usage of polyethylene terephthalate (PET) waste as roadway pavement material. *Journal of Hazardous Materials*, 279, 302-310.

Haddadi, S., Ghorbel, E., & Laradi, N. (2008). Effects of the manufacturing process on the performances of the bituminous binders modified with EVA. *Construction and Building Materials*, 22(6), 1212-1219.

Hafen-Hamburg. (2018). Hafen-hamburg statistics. Retrieved from www.hafen-hamburg.de/en/statistics/

Han, L., Zheng, M., & Wang, C. (2016). Current status and development of terminal blend tyre rubber modified asphalt. *Construction and Building Materials*, 128, 399-409.

Harrigan, E. T., Leahy, R. B., & Youtcheff, J. S. (1994). SHRP-A-379. superpave manual of specifications, test methods and practices Strategic Highway Research Program, National Research Council.

Hınıslioğlu, S., & Ağar, E. (2004). Use of waste high density polyethylene as bitumen modifier in asphalt concrete mix. *Materials Letters*, 58(3-4), 267-271.

Hu, J., Fang, C., Zhou, S., Jiao, L., Zhang, M., & Wu, D. (2015). Rheological properties of packaging-waste-polyethylene-modified asphalt. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 21(3), 215-219.

Huang, S., & Pauli, A. T. (2008). Particle size effect of crumb rubber on rheology and morphology of asphalt binders with long-term aging. *Road Materials and Pavement Design*, 9(1), 73-95.

Huang, Y., Bird, R. N., & Heidrich, O. (2007). A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(1), 58-73.

Hunter, R. N., Self, A., Read, J., & Hobson, E. (2015). *The shell bitumen handbook*. ICE Publishing London, UK.

Jair, M. (2016). Diseño de mezclas asfálticas ultradelgadas mediante la utilización de ligantes modificados especiales. XVII Congreso De Vialidad Y Tránsito, 2016, Rosario, Argentina

Jang, J., Yoo, T., Oh, J., & Iwasaki, I. (1998). Discarded tire recycling practices in the united states, japan and korea. *Resources, Conservation and Recycling*, 22(1-2), 1-14.

Jun, L., Yuxia, Z., & Yuzhen, Z. (2008). The research of GMA-g-LDPE modified qinhuangdao bitumen. *Construction and Building Materials*, 22(6), 1067-1073.

Kalantar, Z. N., Karim, M. R., & Mahrez, A. (2012). A review of using waste and virgin polymer in pavement. *Construction and Building Materials*, 33, 55-62.

Kang, Y., Wang, F., & Chen, Z. (2010). *Reaction of asphalt and maleic anhydride: Kinetics and mechanism* doi://doi.org/10.1016/j.cej.2010.08.020

Karahrodi, M. H., Jazani, O. M., Paran, S. M. R., Formela, K., & Saeb, M. R. (2017). Modification of thermal and rheological characteristics of bitumen by waste PET/GTR blends. *Construction and Building Materials*, 134, 157-166.

Kim, H. H., Mazumder, M., Torres, A., Lee, S., & Lee, M. (2017). Characterization of CRM binders with wax additives using an atomic force microscopy (AFM) and an optical microscopy. *Advances in Civil Engineering Materials*, 6(1), 504-525.

Köfteci, S., Ahmedzade, P., & Kultayev, B. (2014). Performance evaluation of bitumen modified by various types of waste plastics. *Construction and Building Materials*, *73*, 592-602.

Kök, B. V., & Çolak, H. (2011). Laboratory comparison of the crumb-rubber and SBS modified bitumen and hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, *25*(8), 3204-3212.

Lastra-González, P., Calzada-Pérez, M. A., Castro-Fresno, D., Vega-Zamanillo, Á, & Indacochea-Vega, I. (2016). Comparative analysis of the performance of asphalt concretes modified by dry way with polymeric waste. *Construction and Building Materials*, *112*, 1133-1140.

Lee, S., Akisetty, C. K., & Amirkhanian, S. N. (2008). The effect of crumb rubber modifier (CRM) on the performance properties of rubberized binders in HMA pavements. *Construction and Building Materials*, *22*(7), 1368-1376.

Lesueur, D. (2009). The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification. *Advances in Colloid and Interface Science*, *145*(1-2), 42-82. doi:10.1016/j.cis.2008.08.011

Lesueur, D., Teixeira, A., Lázaro, M. M., Andaluz, D., & Ruiz, A. (2016). A simple test method in order to assess the effect of mineral fillers on bitumen ageing. *Construction and Building Materials*, *117*, 182-189. doi://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.003

Li, P., Ding, Z., Zou, P., & Sun, A. (2017). Analysis of physico-chemical properties for crumb rubber in process of asphalt modification. *Construction and Building Materials*, *138*, 418-426.

Li, Y., Li, L., Zhang, Y., Zhao, S., Xie, L., & Yao, S. (2010). Improving the aging resistance of styrene-butadiene-styrene tri-block copolymer and application in polymer-modified asphalt. *Journal of Applied Polymer Science*, *116*(2), 754-761.

Liang, M., Ren, S., Fan, W., Xin, X., Shi, J., & Luo, H. (2017). Rheological property and stability of polymer modified asphalt: Effect of various vinyl-acetate structures in EVA copolymers. *Construction and Building Materials*, *137*, 367-380.

Liu, Y., Zhang, J., Chen, R., Cai, J., Xi, Z., & Xie, H. (2017). Ethylene vinyl acetate copolymer modified epoxy asphalt binders: Phase separation evolution and mechanical properties. *Construction and Building Materials*, *137*, 55-65.

Lu, X., Redelius, P., & Talon, Y. (2008). Aging of bituminous binders – laboratory tests and field data. *Proceedings of the 4th euroasphalt and eurobitumen congress* (pp. 1–12) European Asphalt Pavement Association.

Lu, X., & Isacsson, U. (2002). Effect of ageing on bitumen chemistry and rheology. *Construction and Building Materials*, *16*(1), 15-22.

Lu, X., Isacsson, U., & Ekblad, J. (2003). Influence of polymer modification on low temperature behaviour of bituminous binders and mixtures. *Materials and Structures*, *36*(10), 652-656.

Luo, W., Zhang, Y., & Cong, P. (2017). Investigation on physical and high temperature rheology properties of asphalt binder adding waste oil and polymers. *Construction and Building Materials*, *144*, 13-24.

Luo, W., & Chen, J. (2011). Preparation and properties of bitumen modified by EVA graft copolymer. *Construction and Building Materials*, *25*(4), 1830-1835.

Ma, D., Zhao, D., Zhao, J., Du, S., Pang, J., Wang, W., & Fan, C. (2016). Functionalization of reclaimed polyethylene with maleic anhydride and its application in improving the high temperature stability of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, *113*, 596-602.

Maharaj, C., Maharaj, R., & Maynard, J. (2015). The effect of polyethylene terephthalate particle size and concentration on the properties of asphalt and bitumen as an additive. *Progress in Rubber Plastics and Recycling Technology*, *31*(1), 1-23.

Miró, R., Martínez, A. H., Moreno-Navarro, F., & Rubio-Gámez, M.C. (2015). *Effect of ageing and temperature on the fatigue behaviour of bitumens* doi://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.07.076

Modarres, A., & Hamed, H. (2014). Effect of waste plastic bottles on the stiffness and fatigue properties of modified asphalt mixes. *Materials & Design*, *61*, 8-15.

Modarres, A., Rahmanzadeh, M., & Ayar, P. (2015). Effect of coal waste powder in hot mix asphalt compared to conventional fillers: Mix mechanical properties and environmental impacts. *Journal of Cleaner Production*, *91*, 262-268.

Mogawer, W., T. Bennert, A. Austerman, & C. Ericson. (2015). Investigating the aging mitigation capabilities of rejuvenators in high RAP mixtures using black space diagrams, binder rheology and mixture tests. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, *85*.

Moghaddam, T. B., Karim, M. R., & Syammaun, T. (2012). Dynamic properties of stone mastic asphalt mixtures containing waste plastic bottles. *Construction and Building Materials*, *34*, 236-242.

Mohajerani, A., Vajna, J., Cheung, T. H. H., Kurmus, H., Arulrajah, A., & Horpibulsuk, S. (2017). Practical recycling applications of crushed waste glass in construction materials: A review. *Construction and Building Materials*, *156*, 443-467.

Morawiec, J., Pawlak, A., Slouf, M., Galeski, A., Piorkowska, E., & Krasnikowa, N. (2005). *Preparation and properties of compatibilized LDPE/organo-modified montmorillonite nanocomposites* doi://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2004.11.011

Moreno-Navarro, F., & Rubio-Gámez, M. C. (2016). A review of fatigue damage in bituminous mixtures: Understanding the phenomenon from a new perspective. *Construction and Building Materials*, *113*, 927-938.

Moreno-Navarro, F., Sol-Sánchez, M., Jimenez del Barco, A., & Rubio-Gámez, M. C. (2017). Analysis of the influence of binder properties on the mechanical response of bituminous mixtures. *International Journal of Pavement Engineering*, *18*(1), 73-82.

Moreno-Navarro, F., Sol-Sánchez, M., & Rubio-Gámez, M. C. (2017). Structural analysis of polymer modified bituminous materials in the rehabilitation of light-medium traffic volume roads. *Construction and Building Materials*, *156*, 621-631.

Moreno-Navarro, F., Sol-Sánchez, M., Rubio-Gámez, M. C., & Segarra-Martínez, M. (2014). The use of additives for the improvement of the mechanical behavior of high modulus asphalt mixes. *Construction and Building Materials*, *70*, 65-70.

Moreno-Navarro, F., Sol-Sánchez, M., García-Travé, G., & Rubio-Gámez, M. C. (2018). Fatigue cracking in asphalt mixtures: The effects of ageing and temperature. *Road Materials and Pavement Design*, 19(3), 561-570.

Moreno-Navarro, F., Tauste, R., Sol-Sánchez, M., & Rubio-Gámez, M. C. (2019). New approach for characterising the performance of asphalt binders through the multiple stress creep and recovery test. *Road Materials and Pavement Design*, 20(sup1), S50-S520.

Movilla-Quesada, D., Muñoz, O., Raposeiras, A. C., & Castro-Fresno, D. (2018). Thermal susceptibility analysis of the reuse of fly ash from cellulose industry as contribution filler in bituminous mixtures. *Construction and Building Materials*, 160, 268-277.

Müller, W. W., & Saathoff, F. (2015). Geosynthetics in geoenvironmental engineering. *Science and Technology of Advanced Materials*, 16(3), 034605.

Muniandy, R., & Aburkaba, E. (2011). The effect of type and particle size of industrial wastes filler on indirect tensile stiffness and fatigue performance of stone mastic asphalt mixtures. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5(11), 297-308.

Murphy, M., O'mahony, M., Lycett, C., & Jamieson, I. (2001). Recycled polymers for use as bitumen modifiers. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 13(4), 306-314.

Napiah, M., Habib, N. Z., & Kamaruddin, I. (2014). Creep behavior of polyethylene modified bituminous mixture. *APCBEE Procedia*, 9, 202-206.

Navarro, F. J., Partal, P., Martinez-Boza, F., & Gallegos, C. (2005). Influence of crumb rubber concentration on the rheological behavior of a crumb rubber modified bitumen. *Energy & Fuels*, 19(5), 1984-1990.

Navarro, F. J., Partal, P., Martinez-Boza, F. J., & Gallegos, C. (2010). Novel recycled polyethylene/ground tire rubber/bitumen blends for use in roofing applications: Thermo-mechanical properties. *Polymer Testing*, 29(5), 588-595.

Nejad, F. M., Aghajani, P., Modarres, A., & Firoozifar, H. (2012). Investigating the properties of crumb rubber modified bitumen using classic and SHRP testing methods. *Construction and Building Materials*, 26(1), 481-489.

Nguyen, Q. T., Di Benedetto, H., & Sauzéat, C. (2015). Linear and nonlinear viscoelastic behaviour of bituminous mixtures. *Materials and Structures*, 48(7), 2339-2351.

Nicodème, C., Diamandouros, K., Diez, J., Durso, C., Arampidou, K., & Nuri, A. K. (2017). *Road statistics yearbook 2017*. Brussels, Belgium: European Union Road Federation.

Nien, Y., Yeh, P., Chen, W., Liu, W., & Chen, J. (2008). Investigation of flow properties of asphalt binders containing polymer modifiers. *Polymer Composites*, 29(5), 518-524.

Noelting, M., Arnold, J., & Jones, B. (2005). *Heavy duty pavement: New asphalt designs meet extreme challenges*. SURFERS PARADISE, QUEENSLAND, AUSTRALIA: Australian Asphalt Pavement Association.

Núñez, J. Y. M., Domingos, M. D. I., & Faxina, A. L. (2014). Susceptibility of low-density polyethylene and polyphosphoric acid-modified asphalt binders to rutting and fatigue cracking. *Construction and Building Materials*, 73, 509-514.

ORDEN FOM/273/2016. (2016). Instrucción de carreteras. norma 3.1- IC: Trazado. Madrid, España: Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras.

ORDEN FOM/3460/2003. (2003). Norma 6.1 IC secciones de firme, de la instrucción de carreteras. Madrid, España: Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo.

Orencio-Marrón, J., García-Carretero, J., Rubio, B., & Jiménez, R. Comparación del envejecimiento de una mezcla bituminosa fabricada con betunes modificados con polímero y con caucho de NFU. Paper presented at the *VIII Jornada ASEFMA, Madrid (Spain)*.

Pauli, A. T., Grimes, R. W., Beemer, A. G., Turner, T. F., & Branthaver, J. F. (2011). Morphology of asphalts, asphalt fractions and model wax-doped asphalts studied by atomic force microscopy. *International Journal of Pavement Engineering*, 12(4), 291-309.

Pérez, I., Toledano, M., Gallego, J., & Taibo, J. (2007). Mechanical properties of hot mix asphalt made with recycled aggregates from reclaimed construction and demolition debris. *Materiales De Construcción*, 57(285), 17-29.

Pérez-Lepe, A., Martínez-Boza, F. J., & Gallegos, C. (2005). Influence of polymer concentration on the microstructure and rheological properties of high-density polyethylene (HDPE)-modified bitumen. *Energy & Fuels*, 19(3), 1148-1152.

Petersen, J. C. (2009). A review of the fundamentals of asphalt oxidation: Chemical, physicochemical, physical property, and durability relationships. *Transportation Research E-Circular*, (E-C140)

Pita, A. L. (2010). *Infraestructuras ferroviarias* Universitat Politecnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politecnica.

Plastics Europe. Association of Plastics Manufactures. (2018). *Plastics: The facts 2018 : An analysis of european plastics production, demand and waste data*. (). Retrieved from <http://library.wur.nl/WebQuery/groenekennis/2244125>

Polacco, G., Berlincioni, S., Biondi, D., Stastna, J., & Zanzotto, L. (2005). Asphalt modification with different polyethylene-based polymers. *European Polymer Journal*, 41(12), 2831-2844.

Polacco, G., Filippi, S., Merusi, F., & Stastna, G. (2015). A review of the fundamentals of polymer-modified asphalts: Asphalt/polymer interactions and principles of compatibility. *Advances in Colloid and Interface Science*, 224, 72-112.

Presti, D. L. (2013). Recycled tyre rubber modified bitumens for road asphalt mixtures: A literature review. *Construction and Building Materials*, 49, 863-881.

Punith, V. S., & Veeraragavan, A. (2007). Behavior of asphalt concrete mixtures with reclaimed polyethylene as additive. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(6), 500-507.

Punith, V. S., & Veeraragavan, A. (2010). Behavior of reclaimed polyethylene modified asphalt cement for paving purposes. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(6), 833-845.

- Qadir, A., & Imam, M. (2005). (2005). Use of recycled plastic waste aggregate as a partial substitution material in pavement structure. Paper presented at the *2005 International Symposium on Pavement Recycling*,
- Quintana, H. A. R., Lizcano, F. A. R., & Martínez, B. E. O. (2008). Comportamiento de una mezcla densa de asfalto en caliente modificada con desecho de policloruro de vinilo (PVC). *Ciencia E Ingeniería Neogranadina*, 18(2), 29-43.
- Raad, L., Saboundjian, S., & Minassian, G. (2001). Field aging effects on fatigue of asphalt concrete and asphalt-rubber concrete. *Transportation Research Record*, 1767(1), 126-134.
- Rahman, M. N., Ahmeduzzaman, M., Sobhan, M. A., & Ahmed, T. U. (2013). Performance evaluation of waste polyethylene and PVC on hot asphalt mixtures. *American Journal of Civil Engineering and Architecture*, 1(5), 97-102.
- Ramadan, K. Z., & Ashteyat, A. M. (2009). Utilization of white cement bypass dust as filler in asphalt concrete mixtures. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 36(2), 191-195.
- Ramarad, S., Khalid, M., Ratnam, C. T., Chuah, A. L., & Rashmi, W. (2015). Waste tire rubber in polymer blends: A review on the evolution, properties and future. *Progress in Materials Science*, 72, 100-140.
- Rashid, A. F., & Hossain, Z. (2016). Morphological and nanomechanical analyses of ground tire rubber-modified asphalts. *Innovative Infrastructure Solutions*, 1(1), 36.
- Robertson, R. E., Branthaver, J. F., Plancher, H., Duvall, J. J., Ensley, E. K., Harnsberger, P. M., & Petersen, J. C. (1991). *Chemical properties of asphalts and their relationship to pavement performance*. Washington, DC: Strategic Highway Research Program, National Research Council.
- Roman, C., Cuadri, A. A., Liashenko, I., García-Morales, M., & Partal, P. (2016). Linear and non-linear viscoelastic behavior of SBS and LDPE modified bituminous mastics. *Construction and Building Materials*, 123, 464-472.

Rose, J. G., Teixeira, P. F., & Veit, P. (2011). (2011). International design practices, applications, and performances of asphalt/bituminous railway trackbeds. Paper presented at the *GEORAIL 2011—International Symposium, Paris, France, 19-20*.

Rowe, G. M., King, G., & Anderson, M. (2014). The influence of binder rheology on the cracking of asphalt mixes in airport and highway projects. *Journal of Testing and Evaluation, 42*(5), 1063-1072.

Rowe, G. M., & Sharrock, M. J. (2016). (2016). Cracking of asphalt pavements and the development of specifications with rheological measurements. Paper presented at the *6th Eurasphalt & Eurobitume Congress, Prague, Czech Republic*,

Saboo, N., & Kumar, P. (2015). Optimum blending requirements for EVA modified binder. *International Journal of Pavement Research and Technology, 8*(3), 172.

Sargin, Ş, Saltan, M., Morova, N., Serin, S., & Terzi, S. (2013). Evaluation of rice husk ash as filler in hot mix asphalt concrete. *Construction and Building Materials, 48*, 390-397.

Sengul, C. E., Oruc, S., Iskender, E., & Aksoy, A. (2013). Evaluation of SBS modified stone mastic asphalt pavement performance. *Construction and Building Materials, 41*, 777-783.

Shen, Z. X. J. (2015). Multi-scale evaluation on the interaction between asphalt and crumb rubber. *New Front, 2015*, 10.

Shen, J., Li, B., & Xie, Z. (2017). Interaction between crumb rubber modifier (CRM) and asphalt binder in dry process. *Construction and Building Materials, 149*, 202-206.

Shukla, S. R., Harad, A. M., & Jawale, L. S. (2009). Chemical recycling of PET waste into hydrophobic textile dyestuffs. *Polymer Degradation and Stability, 94*(4), 604-609.

Sienkiewicz, M., Borzędowska-Labuda, K., Zalewski, S., & Janik, H. (2017). The effect of tyre rubber grinding method on the rubber-asphalt binder properties. *Construction and Building Materials, 154*, 144-154.

Sienkiewicz, M., Kucinska-Lipka, J., Janik, H., & Balas, A. (2012). Progress in used tyres management in the european union: A review. *Waste Management, 32*(10), 1742-1751.

Simone, A., Mazzotta, F., Eskandarsefat, S., Sangiorgi, C., Vignali, V., Lantieri, C., & Dondi, G. (2019). Experimental application of waste glass powder filler in recycled dense-graded asphalt mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 20(3), 592-607.

Singh, P., Tophel, A., & Swamy, A. K. (2017). Properties of asphalt binder and asphalt concrete containing waste polyethylene. *Petroleum Science and Technology*, 35(5), 495-500.

Sojobi, A. O., Nwobodo, S. E., & Aladegboye, O. J. (2016). Recycling of polyethylene terephthalate (PET) plastic bottle wastes in bituminous asphaltic concrete. *Cogent Engineering*, 3(1), 1133480.

Sol-Sánchez, M., Pirozzolo, L., Moreno-Navarro, F., & Rubio-Gámez, M. C. (2015). Advanced characterisation of bituminous sub-ballast for its application in railway tracks: The influence of temperature. *Construction and Building Materials*, 101, 338-346.

Sol-Sánchez, M., Pirozzolo, L., Moreno-Navarro, F., & Rubio-Gámez, M. C. (2016). A study into the mechanical performance of different configurations for the railway track section: A laboratory approach. *Engineering Structures*, 119, 13-23.

Speight, J. G. (2004). Petroleum asphaltenes-part 1: Asphaltenes, resins and the structure of petroleum. *Oil & Gas Science and Technology*, 59(5), 467-477.

Stark, W., & Jaunich, M. (2011). Investigation of ethylene/vinyl acetate copolymer (EVA) by thermal analysis DSC and DMA. *Polymer Testing*, 30(2), 236-242.

Sun, L., Wang, Y., & Zhang, Y. (2014). Aging mechanism and effective recycling ratio of SBS modified asphalt. *Construction and Building Materials*, 70, 26-35.

Sureshkumar, M. S., Filippi, S., Polacco, G., Kazatchkov, I., Stastna, J., & Zanzotto, L. (2010). Internal structure and linear viscoelastic properties of EVA/asphalt nanocomposites. *European Polymer Journal*, 46(4), 621-633.

Sutradhar, D., Miah, M., Chowdhury, G. J., & Sobhan, M. A. (2015). Effect of using waste material as filler in bituminous mix design. *American Journal of Civil Engineering*, 3(3), 88-94.

Tayfur, S., Ozen, H., & Aksoy, A. (2007). Investigation of rutting performance of asphalt mixtures containing polymer modifiers. *Construction and Building Materials*, 21(2), 328-337.

Tapkin, S. (2008a). The effect of polypropylene fibers on asphalt performance. *Building and Environment*, 43(6), 1065-1071.

Tapkin, S. (2008b). Mechanical evaluation of asphalt–aggregate mixtures prepared with fly ash as a filler replacement. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 35(1), 27-40.

Tauste, R. (2014). Desarrollo de una herramienta de análisis económico y ambiental de los procesos de fabricación y puesta en obra de mezclas bituminosas. Proyecto fin Carrera para la obtención del título de Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Granada.

Tauste, R., Moreno-Navarro, F., Sol-Sánchez, M., & Rubio-Gámez, M. C. (2018a). The effect of the nature of rejuvenators on the rheological properties of aged asphalt binders. Paper presented at the *RILEM 252-CMB-Symposium on Chemo Mechanical Characterization of Bituminous Materials*, 220-225.

Tauste, R., Moreno-Navarro, F., Sol-Sánchez, M., & Rubio-Gámez, M. C. (2018b). Understanding the bitumen ageing phenomenon: A review. *Construction and Building Materials*, 192, 593-609.

Teixeira, P. F., Ferreira, P. A., Pita, A. L., Casas, C., & Bachiller, A. (2009). The use of bituminous subballast on future high-speed lines in Spain: Structural design and economical impact. *International Journal of Railway*, 2(1), 1-7.

Thurston, R. R., & Knowles, E. C. (1941). Asphalt and its constituents. oxidation at service temperatures. *Industrial & Engineering Chemistry*, 33(3), 320-324.

Topini, D., Toraldo, E., Andena, L., & Mariani, E. (2018). Use of recycled fillers in bituminous mixtures for road pavements. *Construction and Building Materials*, 159, 189-197.

UNE-EN 933-1. (2012). Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado. *AENOR, Asociación Española De Normalización Y Certificación, Madrid*.

UNE-EN 933-3. (2012). Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 3: Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas. *AENOR, Asociación Española De Normalización Y Certificación, Madrid.*

UNE-EN 933-8. (2016). Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 8: Evaluación de los finos. Ensayo del equivalente de arena.. *AENOR, Asociación Española De Normalización Y Certificación, Madrid.*

UNE-EN 1097-2. (2010). Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 2: Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación. *AENOR, Asociación Española De Normalización Y Certificación, Madrid.*

UNE-EN 1097-3. (1999). Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 3: Determinación de la densidad aparente y la porosidad. *AENOR, Asociación Española De Normalización Y Certificación, Madrid.*

UNE-EN 1097-6. (2014). Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua. *AENOR, Asociación Española De Normalización Y Certificación, Madrid.*

UNE-EN 1426. (2015). Betunes y ligantes bituminosos. determinación de la penetración con aguja. *AENOR, Asociación Española De Normalización Y Certificación, Madrid.*

UNE-EN 1427. (2015). Betunes y ligantes bituminosos. determinación del punto de reblandecimiento. método del anillo y bola. *AENOR, Asociación Española De Normalización Y Certificación, Madrid.*

UNE-EN 12697-1. (2015). Betunes y ligantes bituminosos. Determinación de la resistencia al endurecimiento por efecto del calor y del aire. Parte 1: Método RTFOT (película fina y rotatoria). *AENOR, Asociación Española De Normalización Y Certificación, Madrid.*

UNE-EN 12697-5. (2010). Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 5: Determinación de la densidad máxima. *AENOR, Asociación Española De Normalización Y Certificación, Madrid.*

UNE-EN 12697-6. (2012). Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 6: Determinación de la densidad aparente de probetas bituminosas. *AENOR, Asociación Española De Normalización Y Certificación, Madrid.*

UNE-EN 12697-8. (2003). Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezcla bituminosa en caliente. Parte 8: Determinación del contenido de huecos en las probetas bituminosas. *AENOR, Asociación Española De Normalización Y Certificación, Madrid.*

UNE-EN 12697-12. (2019). Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo. Parte 12: Determinación de la sensibilidad al agua de probetas de mezcla bituminosa. *AENOR, Asociación Española De Normalización Y Certificación, Madrid.*

UNE-EN 12697-18. (2018). Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo. Parte 18: Ensayo de escurrimiento del ligante. *AENOR, Asociación Española De Normalización Y Certificación, Madrid.*

UNE-EN 12697-22. (2008). Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 22: Ensayo de rodadura. *AENOR, Asociación Española De Normalización Y Certificación, Madrid.*

UNE-EN 12697-23. (2018). Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo. Parte 23: Determinación de la resistencia a la tracción indirecta de probetas bituminosas. *AENOR, Asociación Española De Normalización Y Certificación, Madrid.*

UNE-EN 12697-25. (2019). Mezclas bituminosas. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo. Parte 25: Ensayo de compresión cíclico. *AENOR, Asociación Española De Normalización Y Certificación, Madrid.*

UNE-EN 12607-26. (2019). Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo. Parte 26: Rigidez. *AENOR, Asociación Española De Normalización Y Certificación, Madrid.*

UNE-EN 12697-34. (2013). Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 34: Ensayo Marshall. *AENOR, Asociación Española De Normalización Y Certificación, Madrid.*

UNE-EN 12697-45. (2013). Mezclas bituminosas. métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. parte 45: Ensayo de rigidez a tracción tras acondicionamiento en saturación (SATS). *AENOR, Asociación Española De Normalización Y Certificación, Madrid.*

UNE-EN 13108-1. (2008). Mezclas bituminosas. Especificaciones de materiales. Parte 1: Hormigón bituminoso. *AENOR, Asociación Española De Normalización Y Certificación, Madrid.*

UNE-EN 13108-5. (2008). Mezclas bituminosas. Especificaciones de materiales. Parte 5: Mezclas bituminosas tipo SMA. *AENOR, Asociación Española De Normalización Y Certificación, Madrid.*

UNE-EN 13302. (2018). Betunes y ligantes bituminosos. determinación de la viscosidad dinámica de los ligantes bituminosos usando un viscosímetro de rotación de aguja. *AENOR, Asociación Española De Normalización Y Certificación, Madrid.*

UNE-EN 13399. (2018). Betunes y ligantes bituminosos. Determinación de la estabilidad al almacenamiento de los betunes modificados. *AENOR, Asociación Española De Normalización Y Certificación, Madrid.*

UNE-EN 14769. (2012). Betunes y ligantes bituminosos. Acondicionamiento por envejecimiento a largo plazo acelerado usando un recipiente de envejecimiento a presión (PAV). *AENOR, Asociación Española De Normalización Y Certificación, Madrid.*

UNE-EN 16659. (2016). Betunes y ligantes bituminosos. Ensayo de la fluencia-recuperación bajo múltiples esfuerzos repetidos (ensayo MSCR). *AENOR, Asociación Española De Normalización Y Certificación, Madrid.*

UNE-EN 103204. (2019). Determinación del contenido de materia orgánica oxidable de un suelo por el método del permanganato potásico. *AENOR, Asociación Española De Normalización Y Certificación, Madrid.*

Van Beukering, P. J., & Janssen, M. A. (2001). Trade and recycling of used tyres in western and eastern europe. *Resources, Conservation and Recycling*, 33(4), 235-265.

Vargas, M. A., Vargas, M. A., Sánchez-Sólis, A., & Manero, O. (2013). Asphalt/polyethylene blends: Rheological properties, microstructure and viscosity modeling. *Construction and Building Materials*, 45, 243-250.

Vasudevan, R., Sekar, A. R. C., Sundarakannan, B., & Velkennedy, R. (2012). A technique to dispose waste plastics in an ecofriendly way—Application in construction of flexible pavements. *Construction and Building Materials*, 28(1), 311-320.

Verhoeven, R., & Juffernbruch, R. (2019). Plasticker.de. average monthly prices of plastics. Retrieved from https://plasticker.de/preise/preise_monat_single_en.php

Whiteoak, C. D. (1990). Analytical pavement design using programs for personal computers. *Highways & Transportation*, 37(8).

Wong, S. F., Htwe, A. A., Oh, S. H., Leo, T. Y., Cheng, J., & Tay, B. K. (2017). (2017). Utilization of waste plastics in stone mastic asphalt for infrastructural applications. Paper presented at the *Materials Science Forum*, 902 55-59.

Wu, S., Pang, L., Mo, L., Chen, Y., & Zhu, G. (2009). Influence of aging on the evolution of structure, morphology and rheology of base and SBS modified bitumen. *Construction and Building Materials*, 23(2), 1005-1010.

Wu, S., Zhu, J., Zhong, J., & Wang, D. (2011). Experimental investigation on related properties of asphalt mastic containing recycled red brick powder. *Construction and Building Materials*, 25(6), 2883-2887.

Xie, Z., & Shen, J. (2014). Effect of cross-linking agent on the properties of asphalt rubber. *Construction and Building Materials*, 67, 234-238.

Xu, O., Xiao, F., Han, S., Amirkhanian, S. N., & Wang, Z. (2016). High temperature rheological properties of crumb rubber modified asphalt binders with various modifiers. *Construction and Building Materials*, 112, 49-58.

Xu, Q., Chen, H., & Prozzi, J. A. (2010). Performance of fiber reinforced asphalt concrete under environmental temperature and water effects. *Construction and Building Materials*, 24(10), 2003-2010.

Xue, Y., Hou, H., Zhu, S., & Zha, J. (2009). Utilization of municipal solid waste incineration ash in stone mastic asphalt mixture: Pavement performance and environmental impact. *Construction and Building Materials*, 23(2), 989-996.

Yan, K., He, W., Chen, M., & Liu, W. (2016). Laboratory investigation of waste tire rubber and amorphous poly alpha olefin modified asphalt. *Construction and Building Materials*, 129, 256-265.

Yan, K., Xu, H., & You, L. (2015). Rheological properties of asphalts modified by waste tire rubber and reclaimed low density polyethylene. *Construction and Building Materials*, 83, 143-149. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.02.092

Yeh, P., Nien, Y., Chen, J., Chen, W., & Chen, J. (2005). Thermal and rheological properties of maleated polypropylene modified asphalt. *Polymer Engineering & Science*, 45(8), 1152-1158.

Yildirim, I. Z., & Prezzi, M. (2011). Chemical, mineralogical, and morphological properties of steel slag. *Advances in Civil Engineering*, 2011

Yu, J., Feng, P., Zhang, H., & Wu, S. (2009). Effect of organo-montmorillonite on aging properties of asphalt. *Construction and Building Materials*, 23(7), 2636-2640. doi://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.01.007

Yu, R., Fang, C., Liu, P., Liu, X., & Li, Y. (2015). Storage stability and rheological properties of asphalt modified with waste packaging polyethylene and organic montmorillonite. *Applied Clay Science*, 104, 1-7.

Yuliestyan, A., Cuadri, A. A., García-Morales, M., & Partal, P. (2016). Binder design for asphalt mixes with reduced temperature: EVA modified bitumen and its emulsions. *Transportation Research Procedia*, 14, 3512-3518.

Zaidullin, I. M., Petrova, L. M., Yakubov, M. R., & Borisov, D. N. (2013). Variation of the composition of asphaltenes in the course of bitumen aging in the presence of antioxidants. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 86(7), 1070-1075.

Zaumanis, M., Mallick, R. B., & Frank, R. (2014). 100% recycled hot mix asphalt: A review and analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 92, 230-245. doi://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.07.007

Zhang, J., Airey, G. D., Grenfell, J., & Apeageyi, A. K. (2018). Moisture sensitivity examination of asphalt mixtures using thermodynamic, direct adhesion peel and compacted mixture mechanical tests. *Road Materials and Pavement Design*, 19(1), 120-138.

Zhang, F., & Hu, C. (2016). The research for crumb rubber/waste plastic compound modified asphalt. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 124(2), 729-741.

Zhang, F., Li, J., Yaseen, M., Han, M., Yin, Y., & Yang, S. (2018). Preparation methods and performance of modified asphalt using rubber-plastic alloy and its compounds. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(8), 04018163.

Zhang, H. L., Yu, J. Y., Feng, Z. G., Xue, L. H., & Wu, S. P. (2012). Effect of aging on the morphology of bitumen by atomic force microscopy. *Journal of Microscopy*, 246(1), 11-19.

Zhang, H., Wu, X., Cao, D., Zhang, Y., & He, M. (2013). Effect of linear low density-polyethylene grafted with maleic anhydride (LLDPE-g-MAH) on properties of high density-polyethylene/styrene-butadiene-styrene (HDPE/SBS) modified asphalt. *Construction and Building Materials*, 47, 192-198.

Zhang, J., Wang, J., Wu, Y., Wang, Y., & Wang, Y. (2009). Evaluation of the improved properties of SBR/weathered coal modified bitumen containing carbon black. *Construction and Building Materials*, 23(7), 2678-2687.

Zhu, J., Birgisson, B., & Kringos, N. (2014). Polymer modification of bitumen: Advances and challenges. *European Polymer Journal*, 54, 18-38.

Zoorob, S. E., & Suparma, L. B. (2000). Laboratory design and investigation of the properties of continuously graded asphaltic concrete containing recycled plastics aggregate replacement (plastiphalt). *Cement and Concrete Composites*, 22(4), 233-242.

ANEXO I

ANNEX I

ANEXO I: DESCRIPCIÓN DE ENSAYOS

A.1 Ensayos para el estudio de la interacción entre polímeros reciclados y betún

En esta parte del Anexo A se recoge una descripción de los ensayos de penetración, punto de reblandecimiento, viscosidad dinámica, estabilidad al almacenamiento, microscopía de fuerza atómica, envejecimiento y análisis reológicos realizados para estudiar la influencia de distintos factores en la interacción entre polímeros reciclados y betún.

A.1.1 Ensayos de caracterización básica de ligantes

Los ensayos de caracterización básica incluyen los ensayos de penetración a 25°C (UNE EN-1426) (Figura A 1 a), determinación del punto de reblandecimiento (UNE EN-1427) (Figura A 1 b) y viscosidad dinámica (UNE EN 13302) a distintas temperaturas (135, 150, 165 y 180°C) (Figura A 1 c).

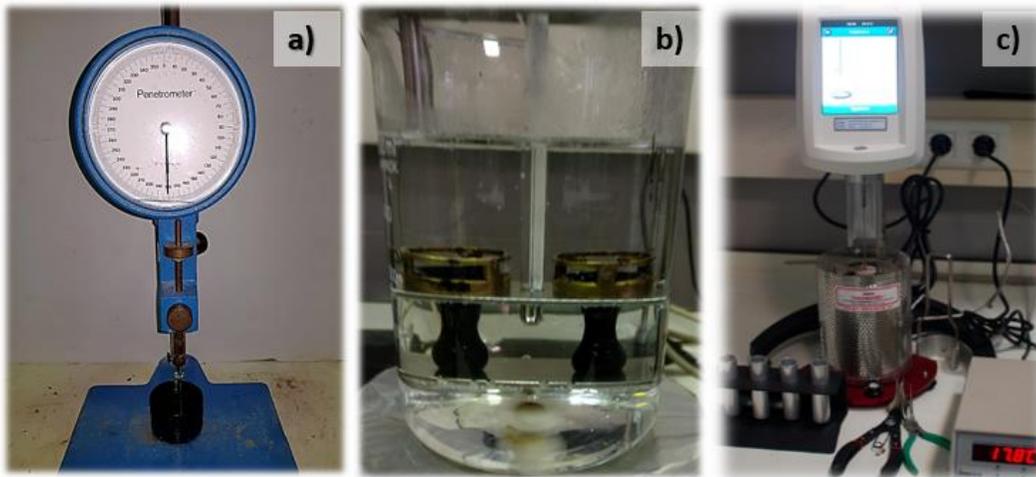


Figura A 1. Ensayos de penetración (a), punto de reblandecimiento (b) y viscosidad dinámica (c) empleados en la caracterización básica de los distintos betunes.

Además, y como primera estimación de la susceptibilidad térmica de los ligantes desarrollados, los resultados de penetración (Pen) y punto de reblandecimiento (SP) fueron empleados para el cálculo del índice de penetración (PI) (Hunter et al. 2015):

$$PI = \frac{1952 - 500 \log(Pen_{25}) - 20 * SP}{50 \log(Pen_{25}) - SP - 120}$$

Este parámetro permite obtener una primera estimación de cómo la adición de los polímeros contribuye a reducir la susceptibilidad a la temperatura del ligante. Esta última se define como la

capacidad de variar el comportamiento del ligante en función de la temperatura manteniendo unas características adecuadas, es decir, resistencia a las deformaciones permanentes a altas temperaturas y a la fisuración a las más bajas. Los valores de este parámetro oscilan entre -3 para ligantes muy susceptibles a las temperaturas altas hasta +7 para aquellos que tienen una elevada susceptibilidad a las temperaturas más bajas (Whiteoak, 1990).

A.1.2 Ensayo de estabilidad al almacenamiento (UNE EN-13999)

Uno de los elementos clave a la hora de determinar la viabilidad del empleo de un polímero como modificador del betún es la evaluación de la estabilidad al almacenamiento del betún resultante. Este ensayo consiste en añadir el betún modificado en un tubo metálico (del tipo de pasta de dientes) el cual, tras ser sellado, permanece en posición vertical en una estufa a 180°C durante 72 horas. Tras esto, y una vez que la muestra se enfría, esta se divide en tres partes iguales y se comparan las partes superior e inferior a través de la diferencia de penetración y temperatura de reblandecimiento.

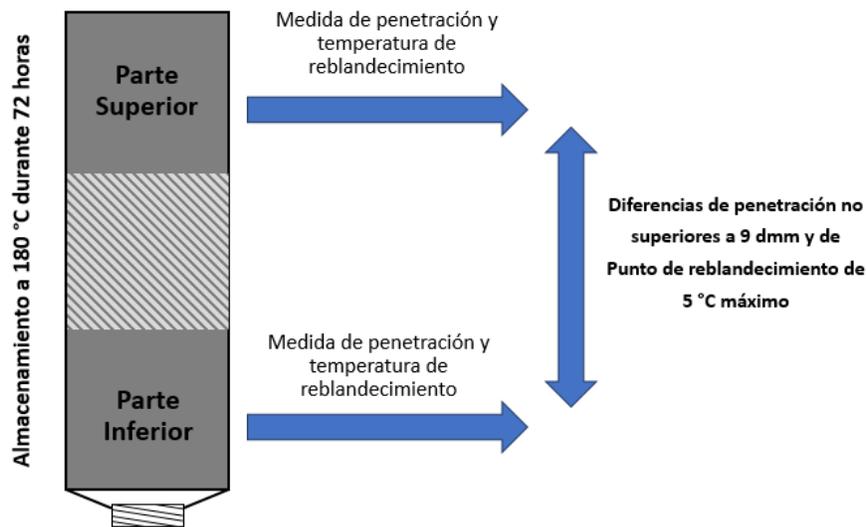


Figura A 2. Esquema del ensayo de estabilidad al almacenamiento.

A.1.3 Ensayos para el estudio del comportamiento reológico de ligantes

A.1.3.1 Barridos de frecuencias y temperaturas

Mediante el empleo del reómetro dinámico de corte (DSR) se realizaron ensayos de barridos de frecuencia (entre 0 y 20 Hz) para un amplio rango de temperaturas (desde 10 a 80°C) realizados a

una amplitud de deformación constante de 0.1%. A partir de los resultados de estos barridos, y para analizar la evolución de las propiedades del ligante con la temperatura, se representaron las isocronas para una frecuencia fija de 5 Hz. Por otra parte, para evaluar la simplicidad termorreológica del material, los datos de ángulo de fase y módulo complejo (G^*) se representaron a través de diagramas de Black (Figura A 3).

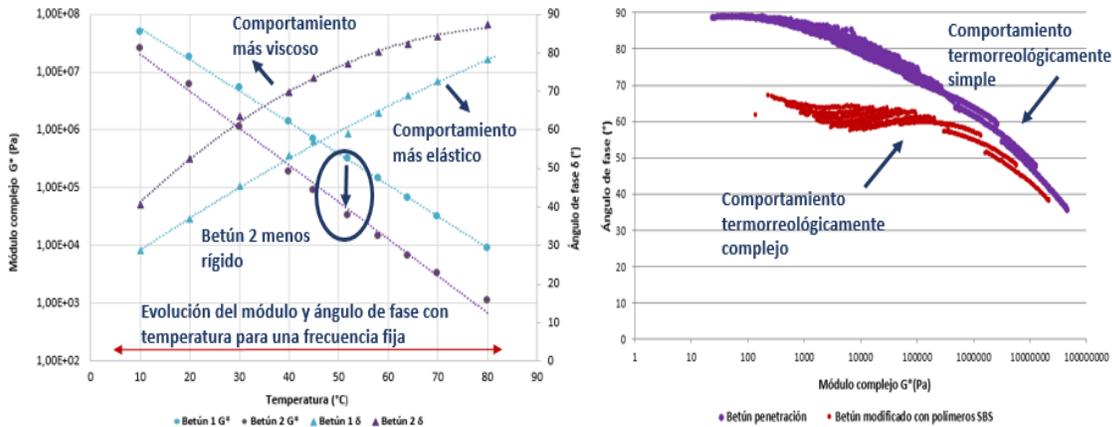


Figura A 3. Ejemplo de representación de isocronas (izquierda) y Diagramas de Black (derecha) para distintos betunes.

A.1.3.2 Evaluación de la susceptibilidad térmica

A partir de los datos obtenidos en los barridos es posible completar el análisis de la susceptibilidad térmica de los ligantes siguiendo el criterio propuestos por otros autores (Edwards, Tasdemir, & Isacson, 2006; Gil & Caldeiro 2012). Para ello, se analizaron los resultados de módulo complejo de rigidez a una frecuencia angular de 10 rad/s (1.6 Hz) para determinar a partir de la pendiente logarítmica entre 25 °C (T1) y 60 °C (T2) la susceptibilidad térmica del betún. La pendiente (S_{25-60}) se expresa mediante la fórmula: $S_{25-60} = [\text{Log } G^* (T2) - \text{Log } G^* (T1)] / (T2-T1)$. Cuanto mayor es dicha pendiente (en valor absoluto), mayor será la sensibilidad a la temperatura del betún (Figura A 4).

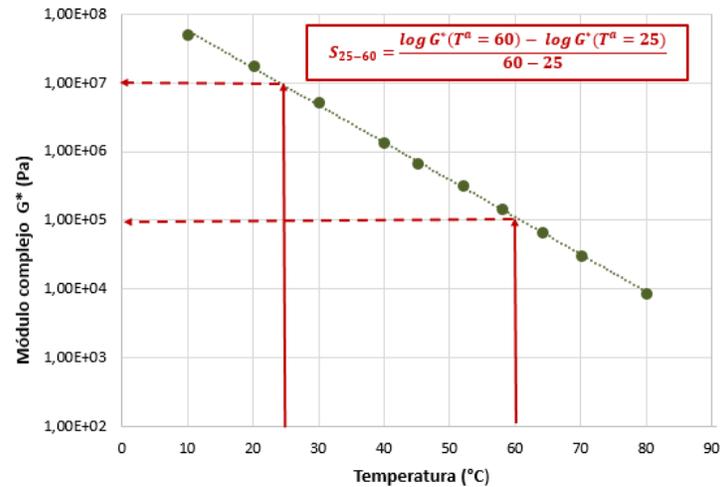


Figura A 4. Ejemplo de la obtención de parámetros para el análisis de susceptibilidad térmica.

A.1.3.3 Índices reológicos para la evaluación del envejecimiento y fisuración del betún a bajas temperaturas

La obtención de estos índices reológicos relacionados con el envejecimiento y el riesgo de fisuración se realiza a través de las curvas maestras de módulo a $15^{\circ}C$ sobre los ligante envejecidos tras el ensayo RTFOT y PAV. A partir de dichas curvas se obtienen:

- Crossover-frequency (ω_0): el cual permite evaluar la dureza general del betún, que es mayor a medida que este valor se reduce.
- R-value: se define como la diferencia entre el valor del módulo vítreo y el valor del módulo dinámico para la Crossover frequency. A medida que aumenta este valor, la curva maestra se vuelve más plana, indicando una transición más gradual del comportamiento elástico al flujo en estado estacionario (Mogawer, Bennert, Austerman & Ericson, 2015)
- Glove-Rowe parameter ($G^* \cdot [\cos \delta]^2 / \sin \delta$): a una temperatura de $15^{\circ}C$ y una frecuencia angular de 0.005 rad/s (Rowe et al., 2016). Este parámetro es un buen indicador del riesgo de fisuración a baja temperatura de las mezclas bituminosas que emplean un determinado betún. Para evaluarlo, se establece dentro de un espacio de Black dos zonas que delimitan el inicio del riesgo de fisuración o la aparición de fisuras significativas (Figura A 5b). Este parámetro tiene una buena correlación con la ductilidad del betún (Rowe, G. M., King, & Anderson, 2014).

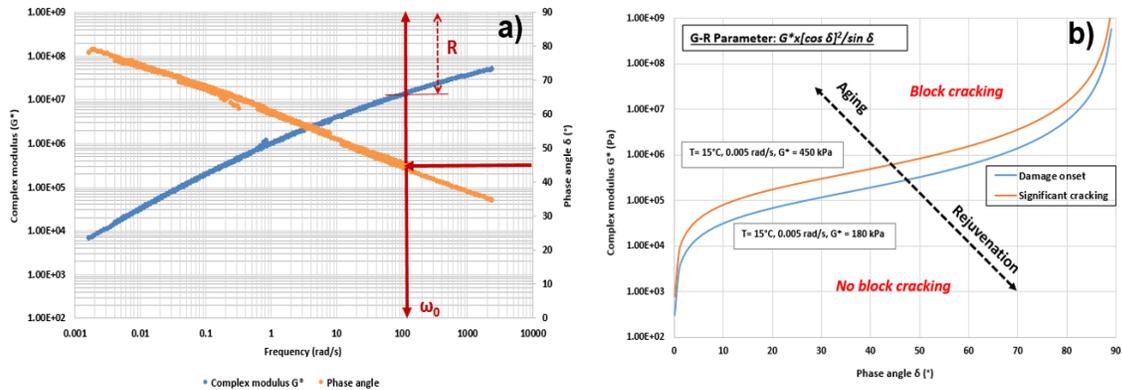


Figura A 5. (a) Obtención de los valores de R-value y Crossover frequency a partir de curvas maestras. (b) Espacio de Black empleado en la representación del Glove-Rowe parameter.

A.1.3.4 Ensayo Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) (UNE EN 16659)

El ensayo de Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) (UNE EN 16659), fue desarrollado por el Federal Highway Administration (FHWA) (D'Angelo et al., 2007) y tiene como objetivo la cuantificación del comportamiento no lineal de los ligantes bituminosos como medio para predecir su respuesta frente a las deformaciones plásticas y su recuperación elástica. Dicho ensayo surgió para proporcionar una mejor caracterización de estos fenómenos que la proporcionada por el parámetro $(G^*/\sin\delta)$ de la normativa PG (performance grade) de Superpave (Harrigan, Leahy, & Youtcheff, 1994), ya que tanto las deformaciones permanentes como el comportamiento de los ligantes modificados con polímeros están asociados a mecanismos no lineales que no son observables mediante dicho análisis.

Para la realización del mismo se fijan tres temperaturas: 45, 64 y 70°C y, en cada una de ellas, se suceden ciclos compuestos de carga y recuperación aplicados al ligante. De esta forma, cada ciclo se compone de un segundo de carga a cortante (alcanzando un pico de deformación) y nueve segundos de recuperación (Figura A 6). En esta investigación se fijaron un total de 60 ciclos de carga-recuperación (30 para cada nivel de carga) de acuerdo con las recomendaciones de otros autores en relación a la aplicación del ensayo en betunes modificados (Golalipur, 2011).

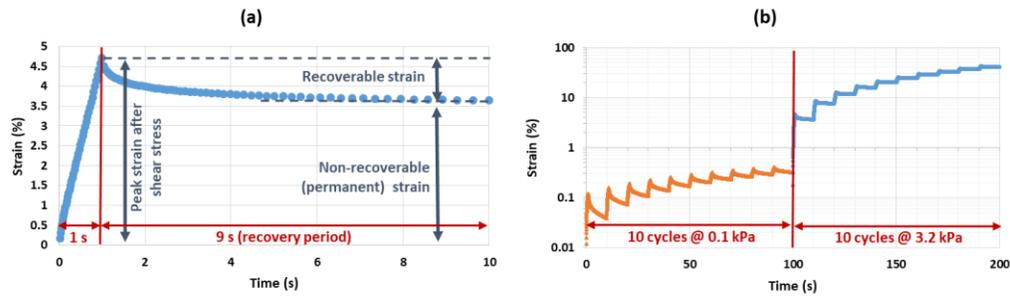


Figura A 6. Descripción del ensayo MSCRT: a) Ciclo individual de carga y parámetros calculados; b) Conjunto de ciclos de carga en un ensayo completo a dos niveles de carga (Moreno-Navarro et al. 2019).

Dentro de estos, los treinta primeros ciclos son realizados a una carga cortante de 0.1 kPa (para evaluar el material dentro del rango visco-elástico lineal) e, inmediatamente después, se realizan otros treinta ciclos en este caso a una carga de 3.2 kPa (para la evaluación del comportamiento mecánico fuera del rango lineal). Como parámetros de análisis se calcula, en primer lugar, el porcentaje promedio de recuperación elástica del ligante. Este es la diferencia entre la recuperación elástica al final de un periodo de recuperación y la deformación pico tras la carga constante y proporciona información acerca del modo en el que el polímero está trabajando en el ligante.

Por otra parte, el parámetro J_{nr} (non recoverable creep compliance) es una medida de la deformación permanente del material tras los sucesivos ciclos de carga y recuperación. Dicho parámetro aporta importante información acerca del grado de resistencia de la mezcla que incorpore el ligante analizado frente a las deformaciones permanentes mediante un ensayo cíclico más cercano al carácter cíclico de la aplicación de las cargas del tráfico.

A.1.3.5 Metodología de análisis MSCRT LabIC.UGR

En este apartado se recoge una descripción de los distintos parámetros e índices derivados del empleo de la nueva metodología de ensayo Multiple Stress Creep and Recovery desarrollada dentro del grupo de investigación LabIC.UGR. Una versión más detallada de los mismos se puede encontrar en el artículo de Moreno-Navarro et al. 2019.

A partir de los ensayos realizados a las tres condiciones temperatura y envejecimiento (45 °C, 70 °C y 45 para una carga de 3.2 kPa, la nueva metodología establece dos nuevos parámetros: la tasa de deformación no recuperada (Non-Recoverable Strain Rate, $\Delta\epsilon_{nr}$, in %/cycles) obtenida mediante la deformación acumulada en los últimos quince ciclos de carga del ensayo, y la deformación media

recuperada de los últimos quince ciclos (Average Recovered Strain, RS_{15-30}). Mediante la representación gráfica de estos parámetros se puede entender el comportamiento del ligante frente a la deformación (Figura A 7) y se pueden obtener dos parámetros más, el índice de flujo (Flow Index, F) y la capacidad de Recuperación (Recovery Capacity, RC).

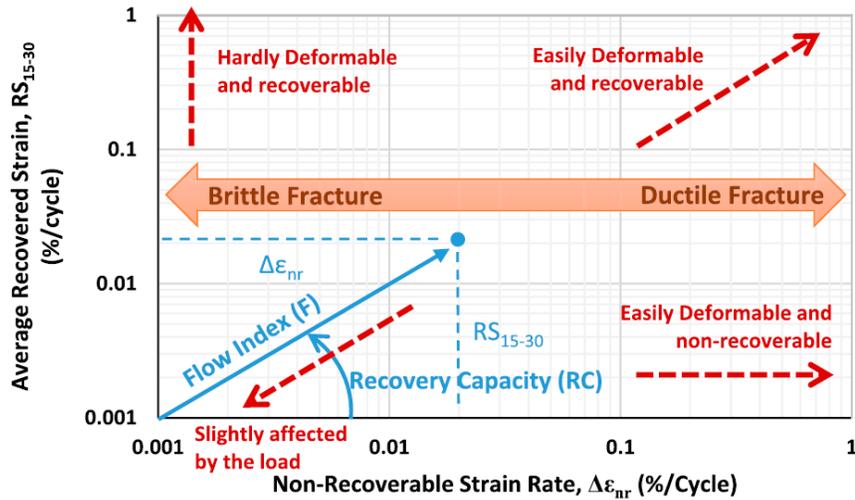


Figura A 7. Representación de los parámetros básicos de análisis de la nueva metodología MSCRT (Moreno-Navarro et al. 2019).

El primero es una medida de la capacidad del ligante de deformar frente a la aplicación de una carga. A medida que es más alto, menor será la capacidad de aguantar esfuerzos sin deformar, independientemente de si dicha deformación es recuperable o no. La Capacidad de Recuperación (RC), por su parte, es una medida cuantitativa (no relativa, como era el porcentaje de recuperación) de la elasticidad del ligante.

Mediante la relación de estos últimos parámetros, se define un nuevo índice de gran utilidad para evaluar la durabilidad de las mezclas que apliquen los betunes ensayados, el L-index. Conforme el índice de flujo crece, la resistencia del material frente a las cargas disminuye mientras que, si el RC aumenta, la resistencia a las deformaciones plásticas y la fatiga se incrementa. Por ello, valores altos de L-index indican una mayor susceptibilidad del ligantes a las cargas y una mayor probabilidad de aparición de problemas debido a la acción del tráfico.

Por último, en la metodología se definen dos índices más que, mediante las relaciones entre F y RC a las distintas temperaturas y condiciones de envejecimiento del ensayo permiten evaluar, por un lado, la susceptibilidad térmica de los betunes (T-index) y, por otro, la susceptibilidad al

envejecimiento de los mismos (A-index). Combinando ambos, se obtiene una referencia global del comportamiento del ligante a los condicionantes ambientales (temperatura y envejecimiento) mediante el AM-index. Al igual que ocurría con el L-index, mayores valores indican una mayor tendencia a problemas en el comportamiento a largo plazo de los betunes y las mezclas que los incorporan. Se ha comprobado la correlación de estos resultados con ensayos típicos de mezclas asfálticas como el Wheel-Tracking test para deformaciones plásticas o el UGR-FACT en la evaluación de la resistencia a fisuración por fatiga. Una explicación más detallada de los distintos índices se puede encontrar en el artículo de Moreno-Navarro et al. (2019).

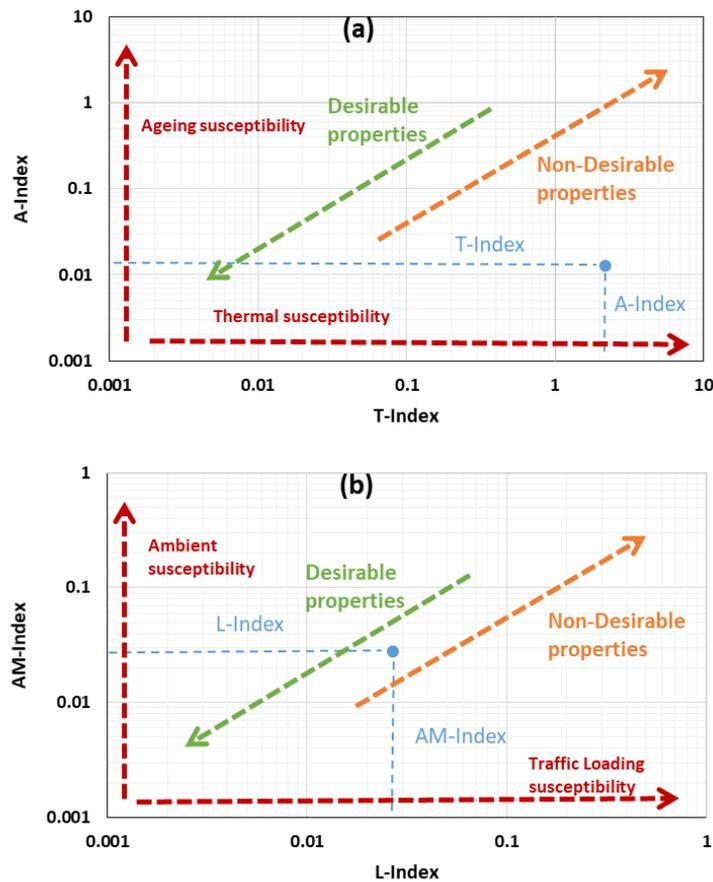


Figura A 8. Representación de los índices de susceptibilidad térmica y al envejecimiento de la nueva metodología MSCRT (Moreno-Navarro et al. 2019).

A.1.4 Microscopía de Fuerza Atómica (AFM)

El microscopio de fuerza atómica (AFM) trabaja en base a las fuerzas de Van der Waals entre los diferentes átomos del material y la sonda del microscopio. Así, manteniendo una fuerza de atracción

fija entre ambos, este escanea la superficie del material a una distancia nanométrica mostrando la morfología del material a un nivel de resolución atómico (Rashid & Hossain, 2016). Se eligió como técnica de obtención de imágenes el escaneado en modo “tapping”, el cual permite evitar dañar la punta de la sonda y reducir la contaminación de la misma obteniendo mejores imágenes. Entre el resto de características del equipo se incluye a continuación:

- Tipo de sonda: ACTA con una punta de sonda de radio de 6 nm
- Soporte de 125 mm de longitud y 35 mm de ancho
- Fuerza nominal promedio aplicada constante de 40 N / m
- Frecuencia de conducción: 300 kHz
- Modo de aplicación: modo altura

Las muestras se prepararon mediante el método térmico, un método simple que causa un efecto insignificante en la morfología del material en comparación con el empleo de solventes (Das, Baaj, Tighe, & Kringos, 2016). Tras ello, se obtuvieron imágenes topográficas y de fase a temperatura ambiente con una velocidad de barrido de 0,6 Hz y un tamaño de imagen de 10 por 10 μm (incluyendo barridos de 5 por 5 μm en algunas zonas para mayor detalle). Para asegurar la homogeneidad de las estructuras observadas, se analizaron tres zonas diferentes para cada tipo de betún.

Como su nombre indica, las imágenes topográficas proporcionan información derivada la altura relativa de las distintas estructuras encontradas a medida que la punta del actuador del microscopio escanea a lo largo de la superficie de la muestra. Tras este escaneo, se genera electrónicamente una imagen en distintos colores a medida que el microscopio responde a las distintas estructuras de la superficie de la muestra variando el desplazamiento del eje Z para mantener un amortiguamiento constante del resorte voladizo oscilante sobre el que se monta la punta de la sonda (Pauli, Grimes, Beemer, Turner, & Branthaver, 2011).

En relación con el análisis de fases, dichas imágenes son generadas por la diferencia de tiempo entre el actuador del microscopio y la respuesta oscilatoria registrada a medida que la sonda se encuentra con las diferentes estructuras presentes en la superficie de la muestra (Pauli et al. 2011).

A.1.5 Envejecimiento de ligantes bituminosos

A la hora de simular en laboratorio el proceso de envejecimiento de los distintos ligantes bituminosos estudiados, se hace uso del ensayo RTFOT para el envejecimiento durante la

fabricación, transporte y puesta en obra, y del ensayo PAV para el envejecimiento durante la vida de servicio del material.

A.1.5.1 Envejecimiento a corto plazo. Ensayo de película fina y rotatoria (RTFOT) (UNE EN-12607-1)

Para la realización del ensayo RTFOT, se emplean botellas de cristal sobre las que se añade una cantidad de 35 gramos de betún. Dichas botellas son colocadas en posición horizontal sobre un dispositivo giratorio dentro de una estufa que permite la creación de una película de 1.75 mm de ligante que es acondicionada a 163 °C durante 75 minutos mientras se inyecta aire dentro de la botella. De este modo, es posible reproducir el envejecimiento que ocurre durante los procesos de fabricación, transporte y puesta en obra de las mezclas bituminosas.

Para el estudio de los ligante modificados, y como medida para solventar los posibles problemas derivados de la mayor viscosidad de estos, se hizo uso del método descrito en el ensayo MRTFO (Airey, 2003) consistente en introducir unos cilindros de acero dentro de las botellas de envejecimiento para facilitar la creación de la película fina de ligante y evitar el escape del mismo.



Figura A 9. Botellas empleadas para el ensayo RTFOT con y sin la incorporación de barra metálica.

A.1.5.2 Envejecimiento a corto plazo. Acondicionamiento por envejecimiento a largo plazo acelerado usando un recipiente de envejecimiento a presión (PAV) (UNE EN-12607-1)

Para la realización de este ensayo, se colocan bandejas sobre las que se añade una cantidad de 50 g de betún de manera que se crea una película de 3.2 mm de espesor. Dichas bandejas son

acondicionadas en un recipiente sometido a una presión de aire de 2.07 MPa a una temperatura y tiempo determinados. Para la realización de esta tesis se emplearon las condiciones más extendidas: 100 °C de temperatura durante 20 horas.

A.2 Ensayos para la caracterización del comportamiento mecánico de morteros bituminosos

A la hora de evaluar el comportamiento a fatiga de los distintos morteros, el procedimiento de ensayo se llevó a cabo sobre dos grupos de muestras de cada tipología (siguiendo una metodología similar a la establecida en el ensayo de sensibilidad al agua de mezclas bituminosas (UNE EN 12697-12) de manera que se pudiese evaluar la susceptibilidad del material a la humedad.

Así, se definió un grupo seco de muestras que se mantuvo a una temperatura de 25 °C y un grupo húmedo que se acondicionó 72 horas en agua a 40 °C (Figura A 10). Transcurrido este tiempo, las probetas de uno y otro grupo se acondicionan a 35 °C durante una hora previo a su ensayo. La comparación entre la características visco-elásticas (módulo complejo y ángulo de fase) y número de ciclos de carga hasta la rotura para los morteros de uno y otro grupo, permiten comparar la susceptibilidad al agua de los materiales fabricados con las distintas tipologías de filler.



Figura A 10. Acondicionamiento de las muestras frente a la acción del agua.

De esta forma, y para la caracterización de los materiales se realizan dos tipos de ensayo: un barrido de amplitudes para determinar el nivel de deformación que inicia el daño de la probeta, y el ensayo de fatiga como tal a distintas cargas.

A.2.1 Barrido de amplitudes

Dentro de la determinación de la resistencia a fatiga bajo carga cíclica es importante separar los distintos estados por los que pasa el mortero bituminoso hasta llegar a fallar por rotura (Figura A 11). De este modo, se puede valorar si variaciones en las propiedades visco elásticas medidas por el ensayo (módulo dinámico y ángulo de fase) se deben a la presencia de un daño por fisuración debido a fatiga o, en un estado anterior, al abandono de la zona donde dichas propiedades se comportan de manera lineal (Branco & Franco, 2008). El ensayo de barrido de amplitudes permite establecer dichos estados.

Dicho ensayo fue realizado sobre un conjunto de muestras sometidas a flexión en tres puntos. Este barrido abarca un rango de deformación entre 1 y 50 micras y se realiza a una frecuencia de 5Hz y a una temperatura de 35° C. Las probetas se acondicionan a la temperatura de ensayo durante una hora previo al comienzo de éste. En base a los resultados obtenidos en dicho barrido de deformaciones, es posible establecer el nivel de deformación para el cual comienza el daño en la probeta fijar la precarga para el ensayo de fatiga (Figura A 11).

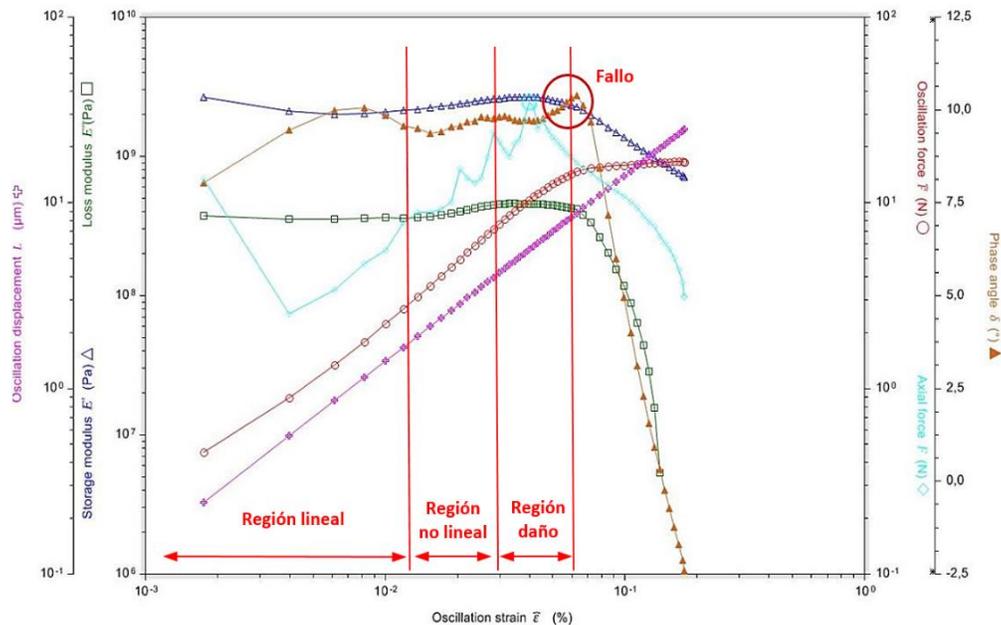


Figura A 11. Barrido de amplitudes para determinar condiciones de fatiga.

A.2.2 Evaluación de la resistencia a fatiga

En la evaluación de la resistencia a fatiga ante cargas cíclicas, las probetas se someten a tres escalones de carga a un nivel de deformación inferior al que provoca el fallo del material

(determinado en el paso anterior) y similar en todos los materiales (utilizando una precarga correspondiente al valor de fuerza registrado para dicho nivel de deformación en el barrido de amplitudes).

De ese modo, se asegura el contacto entre actuador y probeta durante todo el ensayo, así como un nivel de deflexión homogéneo. Las condiciones de frecuencia y temperatura se mantienen respecto al paso anterior y se analiza la evolución del módulo de rigidez y ángulo de fase durante todo el ensayo. Para conocer el ciclo en el que se produce la rotura del material, se utiliza el control por imagen durante el ensayo (Figura A 12).



Figura A 12. Control de rotura de probetas por imagen.

Además, para cuantificar de manera precisa el ciclo de carga en el que se produce la rotura, se representan a lo largo del tiempo el ángulo de fase y el módulo dinámico de rigidez (Figura A 13). Al ser estos parámetros propiedades intrínsecas del material, una variación brusca de los mismos nos indica el punto en el que se hace efectiva la rotura (Branco & Franco, 2008). En este caso y para establecer un criterio homogéneo, se eligió como criterio de fallo una caída del 50% del valor máximo de módulo registrado.

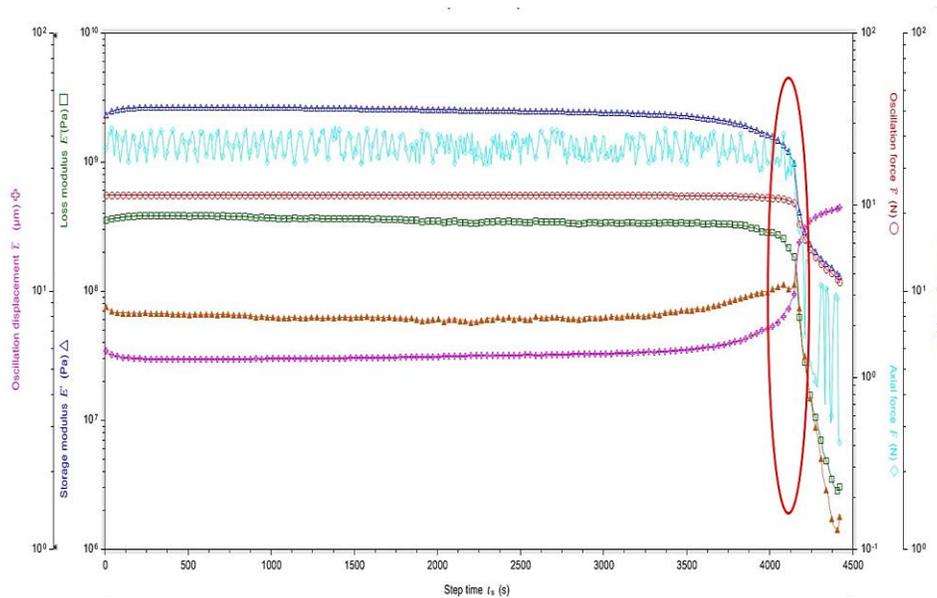


Figura A 13. Ejemplo de ensayo de fatiga sobre probetas de mortero.

A.3 Ensayos para la caracterización del comportamiento mecánico de mezclas bituminosas

A.3.1 Ensayo Marshall (UNE EN 12697-34)

Para la realización de este ensayo se fabricaron probetas compactadas mediante un compactador de impactos aplicando 50 golpes a cada cara de la probeta. Tras determinar sus propiedades volumétricas (densidad máxima, densidad aparente y contenido de huecos), las probetas se sumergen en un baño de agua a 60°C durante un tiempo entre 40 y 60 minutos. Tras ello, las probetas se sitúan en el dispositivo de la Figura A 14 y se aplica carga a una velocidad constante de (50 ± 2) mm/min continuando hasta alcanzar la carga máxima en el dispositivo de medición. A partir de dicha carga se obtiene la estabilidad (S) usando un factor de corrección por la altura de la probeta. Para la deformación (F) se mide en el gráfico de fuerza/desplazamiento la distancia desde la intersección de la tangente y la línea base hasta el punto donde se alcanza la carga máxima.



Figura A 14. Ensayo Marshall.

A.3.2 Ensayo de Sensibilidad al agua (UNE EN 12697-12)

Este ensayo evalúa la susceptibilidad de las mezclas a la acción del agua, un importante factor de fallo de estas ya que es responsable de la pérdida de adhesividad entre el ligante y la superficie de los áridos. El ensayo consiste en la fabricación de seis probetas compactadas mediante el compactador de impactos y separadas en dos grupos: uno húmedo acondicionado en agua a 40°C durante 72 horas, y otro seco acondicionado a $20 \pm 5^\circ\text{C}$. Tras el acondicionamiento, las probetas son fracturadas mediante tensión indirecta (Figura A 15) a una temperatura de ensayo de 15°C. La relación entre la resistencia a tracción indirecta de uno y otro grupo expresada en porcentaje establece la resistencia a la tracción indirecta retenida (ITSR), el cual es un parámetro indicativo del daño causado por la acción del agua.



Figura A 15. Ensayo de sensibilidad al agua.

A.3.3 Ensayo de Rigidez de mezclas bituminosas (UNE EN 12697-26 Anexo C)

Uno de los parámetros claves para comprender la capacidad de resistir y disipar tensiones de las distintas mezclas estudiadas es el módulo de rigidez. La modificación de este parámetro en función de los distintos polímeros reciclados incorporados a la misma aporta información sobre la capacidad estructural de las mismas. Este ensayo se realiza sobre probetas tipo Marshall. Durante el ensayo se aplican 15 ciclos de carga de tipo semi sinusoidal a tracción indirecta con un tiempo de subida de 124 ± 4 s en un régimen de deformación controlada ($5 \mu\text{m}$). El ensayo es posteriormente repetido en un diámetro perpendicular. El módulo de rigidez se calcula entonces como el valor medio de los últimos 5 ciclos registrados en cada uno de los diámetros ensayados.

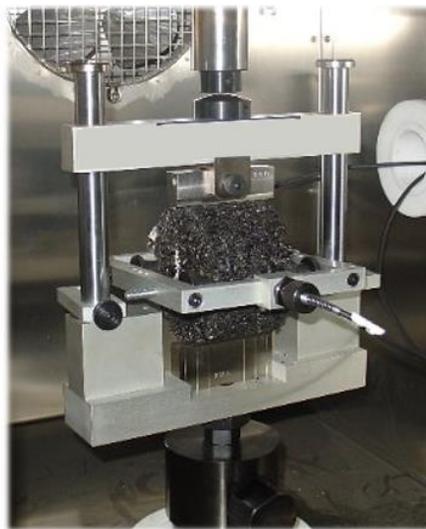


Figura A 16. Ensayo de módulo de rigidez.

A.3.4 Ensayo de Ecurrimiento de ligante (UNE EN 12697-18)

Cuando se definía el empleo de mezclas discontinuas o de tipo SMA para rodadura, se encontraba que especialmente en el caso de esta última tipología de mezcla su discontinuidad, poca presencia de árido fino y alto contenido de ligante podían dar lugar a problemas de escurrimiento de betún durante las tareas de mezclado, transporte y puesta en obra (Tayfur, Ozen, & Aksoy, 2007). Para evaluar este fenómeno, se realizó el ensayo de escurrimiento de ligante usando el método de Schellenberg (Figura A 17). Para ello, la mezcla disgregada se coloca en un vaso de precipitado y se coloca en una estufa a 180°C durante una hora. Transcurrido este tiempo, el vaso de precipitado se vuelca suavemente hasta quedar invertido y se mantiene en esa posición durante 10 ± 1 s. Tras enfriar el vaso se pesa el contenido restante.



Figura A 17. Ensayo de escurrimiento de ligante por el método de Schellenberg (Jair, 2016).

A.3.5 Ensayo de rodadura (UNE EN 12697-12)

El ensayo de rodadura es habitualmente empleado para evaluar la resistencia de las mezclas bituminosas a las deformaciones permanentes causadas por la acción del tráfico a altas temperaturas, en condiciones que simulan de manera efectiva el paso de los vehículos. Este parámetro es de gran importancia a la hora de establecer la durabilidad de una determinada mezcla.

El procedimiento de ensayo involucra la fabricación de dos probetas paralelepípedas con un compactador de placa. Estas muestras se acondicionan a 60°C y el ensayo se extiende hasta 10000 pasadas de una rueda cargada que simula el tráfico o hasta que la deformación alcanzada por la probeta alcanza los 20 mm. Además de la huella o deformación causada por las pasadas, para este ensayo se determina la pendiente de deformación entre los ciclos 5000 y 10000.



Figura A 18. Ensayo de rodadura.

A.3.6 Ensayo de resistencia a la fisuración por fatiga. UGR –FACT.

Este procedimiento de ensayo reproduce las condiciones que dan lugar a la aparición de fisuración por fatiga en mezclas bituminosas (gradientes en las cargas de tráfico y gradientes de temperatura). Para ello, se ensayan probetas fabricadas a partir del aserrado de probetas de rodadura, de dimensiones 40 x 60 x 120 mm, usando un dispositivo sencillo compuesto por un soporte deslizante (con un muelle de recuperación) y dos elementos elásticos (láminas de caucho) situados bajo las placas de soporte. Estos últimos tienen como misión simular tanto los esfuerzos de flexión como los cortantes causadas por las cargas del tráfico, y las tensiones de tracción que son fruto de los gradientes térmicos.

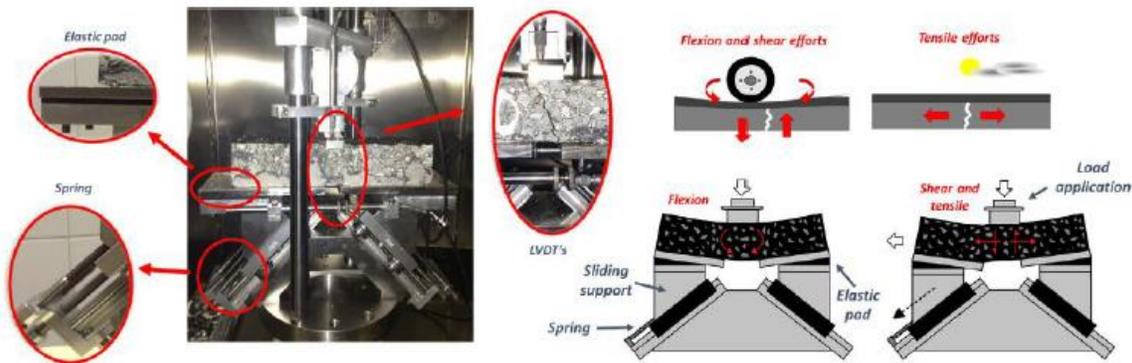


Figura A 19. Ensayo UGR-FACT (Moreno-Navarro & Rubio-Gómez, 2016).

Para el control de deformación de la probeta se emplean cuatro LVDTs (un vertical y un horizontal en cada lado de la probeta). Estos permiten registrar los dos tipos de desplazamiento producidos durante el ensayo: por un lado, los desplazamientos permanentes (h_i , v_i) registrados durante cada ciclo de aplicación de carga y relacionados con la deformación permanente que causa el daño del material y, por otro lado, un desplazamiento relativo (H_i , V_i) relacionado con la consistencia (rigidez) o estado de daño para un ciclo concreto (Moreno-Navarro et al. 2017). Estos últimos permiten definir la energía disipada en cada ciclo de carga obtenida por combinación de las energías disipadas en las direcciones vertical y horizontal. Dichas energías se obtienen a partir del valor de las áreas contenidas dentro de los ciclos de histéresis:

$$\omega_i = \omega_{v_i} + \omega_{h_i}$$

Donde,

ω_i = Energía disipada por unidad de volumen (J/m^3)

ω_{hi} = Energía disipada en la dirección horizontal por unidad de volumen (J/m^3)

ω_{vi} = Energía disipada por unidad de volumen (J/m^3)

A partir de la energía disipada, se calculó otro parámetro que permite evaluar la evolución del daño relativo de las mezclas ensayadas, el Ratio de cambio de energía disipada acumulada (RDEC, por sus siglas en inglés):

$$RDEC_n = \sum_{i=1}^n \frac{\omega_{i+1} - \omega_i}{\omega_i}$$

Donde,

ω_i = Energía disipada por unidad de volumen en el ciclo i (J/m^3)

ω_{i+1} = Energía disipada por unidad de volumen en el ciclo $i + 1$ (J/m^3)

Por último, y empleando este último parámetro, es posible definir un Parámetro Medio de Daño (γ), como medida cuantitativa de la resistencia a la fisuración del material bajo las condiciones de ensayo fijadas:

$$\gamma = \frac{RDEC_{Nf}}{Nf}$$

Donde,

$RDEC_{Nf}$ = Es el Ratio de energía disipada acumulada en el ciclo final del ensayo

Nf = Número final de ciclos del ensayo.

A.3.7 Ensayo rigidez a tracción tras acondicionamiento en saturación (SATS) (UNE EN 12697-45)

Este ensayo permite evaluar al mismo tiempo la susceptibilidad al envejecimiento y a la acción del agua de mezclas bituminosas. Para la realización del ensayo se siguen varios pasos:

- En la fase de acondicionamiento, cinco probetas de tipo Marshall son saturadas en agua empleando un equipo de vacío.

- A continuación, las probetas se pasan a un recipiente presurizado parcialmente cubierto de agua (Figura A 20), donde son sometidas a una temperatura de acondicionamiento de 85 °C y una presión de confinamiento de 2.1 MPa durante 65 horas. Dentro del recipiente, la mayoría de probetas permanece sobre el nivel de agua, pero otras permanecen sumergidas parcial o totalmente.
- Tras la fase de acondicionamiento se deja un periodo de enfriamiento de 24 horas antes de liberar la presión del aire y abrir el recipiente.
- Como medida del efecto del agua y el envejecimiento de las mezclas, las condiciones de saturación y el módulo de rigidez a 20° C (EN 12697-26:2012, Anexo C) (Figura A 16) fueron evaluados para las distintas probetas antes y después de la realización del ensayo.

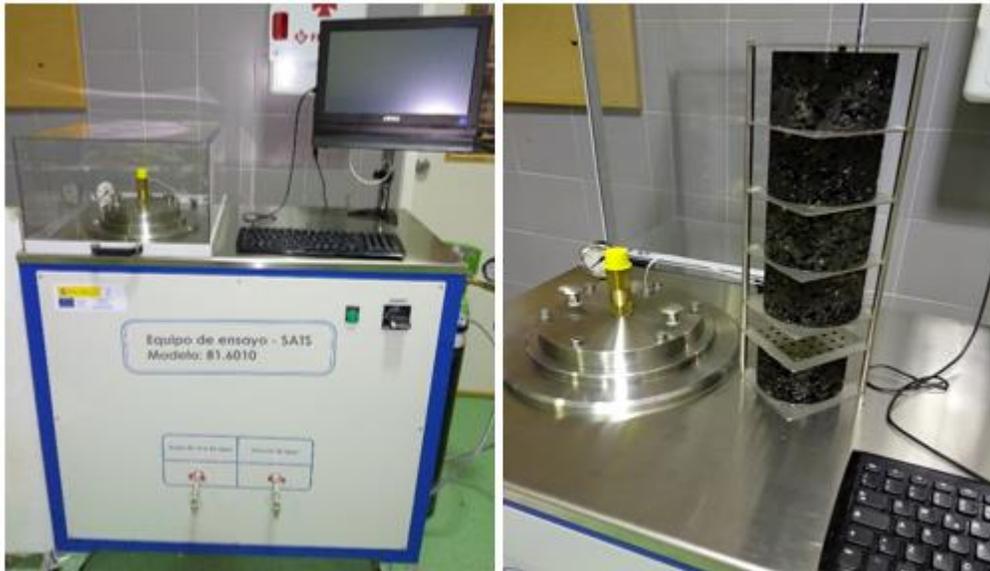


Figura A 20. Dispositivo de ensayo SATS.

A.4 Ensayos para la caracterización del comportamiento mecánico de mezclas bituminosas empleadas como subbalasto bituminoso

A.4.1 Ensayo triaxial de compresión cíclico (UNE EN 12697-25 Anexo B)

Este ensayo permite determinar las características de fluencia de la mezcla a través del sometimiento de una probeta a esfuerzos de confinamiento y axiales cíclicos. Para ello, se acondiciona una probeta cilíndrica a una temperatura de 40°C para, después, colocarla entre dos

platos de carga planos y paralelos. La probeta se somete a una presión de confinamiento de 120 kPa a la que se superpone una presión axial cíclica de 300 kPa de carácter sinusoidal con una frecuencia de 3 Hz. Durante el ensayo se mide el cambio de altura de la probeta para un número específico de ciclos de carga. Partiendo de ello, se determinó la deformación axial acumulada (deformación permanente) en función del número de aplicaciones de carga y la relación de fluencia del material.

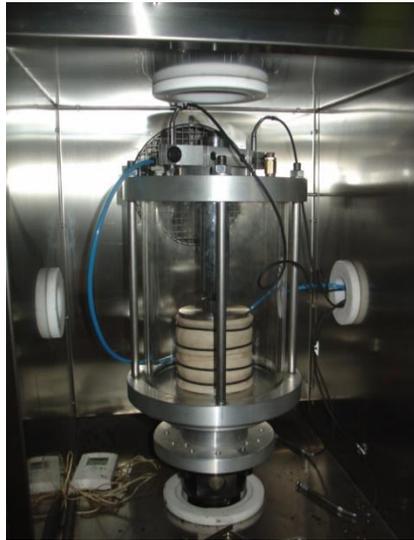


Figura A 21. Ensayo triaxial para la determinación de la resistencia a deformación permanente.

A.4.2 Ensayo de punzonamiento para subbalasto bituminoso

El ensayo consiste en el estudio de probetas de subbalasto bituminoso de 30 x 30 x 6 cm fabricadas con las distintas mezclas y compactadas mediante compactador vibratorio. Estas probetas son introducidas en un molde de metal para su confinamiento y acondicionadas durante dos horas a la temperatura de ensayo, 40 °C previo a la realización del mismo.

Para simular el proceso de punzonamiento, se construyó una placa rígida con balasto y resina epoxi de 15 x 15 cm acoplada a un actuador, de manera que esta placa quedaba en contacto con la mezcla durante todo el ensayo y se aplicaba a través de la misma una carga constante de 5.25 kN (el equivalente a una presión de en torno a 230 MPa) aplicada a una frecuencia de 5 Hz. Durante toda la duración del ensayo, se monitorizaba el desplazamiento vertical mediante el empleo de dos extensómetros de ± 5 mm de amplitud situados en ambos extremos de la placa de manera que se pudiese evaluar la evolución del punzonamiento (Figura A 22). El ensayo se prolonga durante 100000 ciclos de carga o hasta que el desplazamiento vertical alcanza un punzonamiento de 9.5 mm.



Figura A 22. Equipo empleado para el ensayo de punzonamiento.

En relación a la evaluación del punzonamiento, en primer lugar, se representa la evolución del mismo frente a los ciclos de aplicación de la carga para, más tarde y a partir de la misma, obtener mediante las pendientes de la curva en distintos tramos del ensayo índices que caracterizan la resistencia del subbalasto al punzonamiento a corto y largo plazo. Tal y como se puede ver en la Figura A 23, se comienza trazando la tangente desde el punto final del ensayo a la curva de punzonamiento y dicha recta se intersecciona con la formada por el origen y el punto de la curva correspondiente a los 5000 primeros ciclos de carga (punzonamiento a corto plazo). De este modo se obtiene el punto característico “A” de inflexión de comportamiento para el cual, una vez trasladado a la curva, se establece el punzonamiento y el número de ciclos correspondiente.

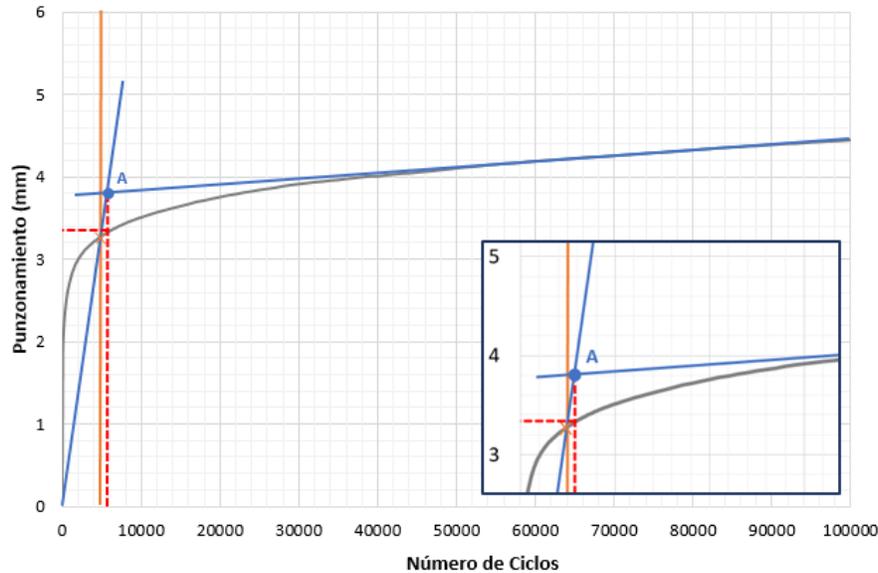


Figura A 23. Esquema de la obtención de los parámetros de análisis del ensayo de punzonamiento.

Con estos parámetros, los índices de resistencia al punzonamiento a corto y largo plazo se definen como:

$$IP_{\text{corto plazo}} = \frac{\text{Punzonamiento en "A"}}{\text{Número de ciclos en "A"}}$$

$$IP_{\text{largo plazo}} = \frac{\text{Punzonamiento al final del ensayo}}{\text{Ciclos totales hasta el fin del ensayo}}$$

A.5 Ensayos para la caracterización del comportamiento mecánico de mezclas bituminosas empleadas como pavimento portuario

A.5.1 Ensayo de Punzonamiento Estático UGR-PASPT (University of Granada- Port Asphalt Static Punching Test)

Con este ensayo se logra simular las tensiones transmitidas al pavimento por cargas estáticas procedentes de mercancías almacenadas (apiladas o no) o vehículos pesados, que se encuentran estacionados durante un periodo de tiempo más o menos prolongado en determinadas zonas de puertos (o aeropuertos). Dicho ensayo establece unos condicionantes de diseño del material a partir de los cuales se evalúa la tasa de fluencia bajo carga estática prolongada en el tiempo, asociada a su respuesta visco-elástica.

Para del mismo, se fabricaron dos probetas de cada tipología de mezcla de dimensiones 300 x 300 x 60 mm compactadas mediante el empleo de un compactador de placa vibratorio. Tras la fabricación, cada probeta era confinada en un molde de metal de 300 x 300 x 120 mm y colocada de manera centrada en la prensa de ensayo. Para medir la deformación de la probeta se emplearon dos extensómetros de ± 5 mm situados en las esquinas opuestas del molde (Figura A 24). El actuador empleado, se compone de una pieza de acero inoxidable de caras pulidas de dimensiones: 175 x 150 x 120 mm el cual se corresponde con las medidas de las patas de los contenedores estándar o TEU's (Twenty-foot Equivalent Unit).



Figura A 24. Equipo y actuador empleados en el ensayo de punzonamiento estático.

Tras una precarga de 0,015 kN, se aplica una carga monotónica continua y se va registrando la deformación de la probeta. En este caso, se ensayaron dos niveles de carga: 2.6 MPa y 5.2 MPa, los cuales se corresponden con el apilamiento de uno y, entre dos y tres, contenedores de tipo TEU respectivamente. El ensayo termina cuando se produce un asiento por punzonamiento estático de 50 mm. Alternativamente, si no se ha producido dicho asiento, el ensayo terminaría a las 10 horas de haber comenzado.

En cuanto a los parámetros analizados, el primero de ellos es la velocidad de deformación por punzonamiento ($d\epsilon/dt$). Para determinarla, se realiza un análisis de regresión lineal sobre el segundo tramo (es decir, del 50 al 100% del ensayo) de la curva media obtenida en la representación de la

deformación del volumen representativo del material con respecto al tiempo de ensayo. La pendiente de dicha recta de regresión determinará la velocidad de deformación por punzonamiento de cada material. A menor velocidad de punzonamiento, mayor resistencia del mismo.

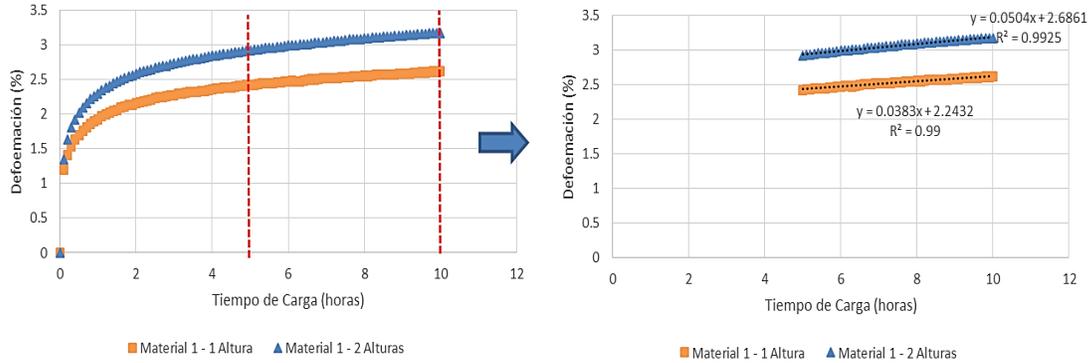


Figura A 25. Ejemplo de cálculo de la velocidad de deformación para dos niveles de carga.

El segundo parámetro analizado es el límite de Resistencia a Punzonamiento Estático (LRPE). Dicho límite se corresponde con el valor de amplitud de carga por debajo del cual el material no sufrirá deformaciones por punzonamiento estático. Para determinarlo, se representan los niveles de tensión aplicada (en MPa) con respecto a los valores de corte con el eje Y (en %) obtenidos en el análisis de regresión lineal empleado en el análisis anterior (Figura A 26). Sobre dicha representación se lleva a cabo un nuevo análisis de regresión lineal, determinando el valor de tensión para el cual dicha recta se corresponde con un nivel bajo de deformación (entre el 1 y el 3%).

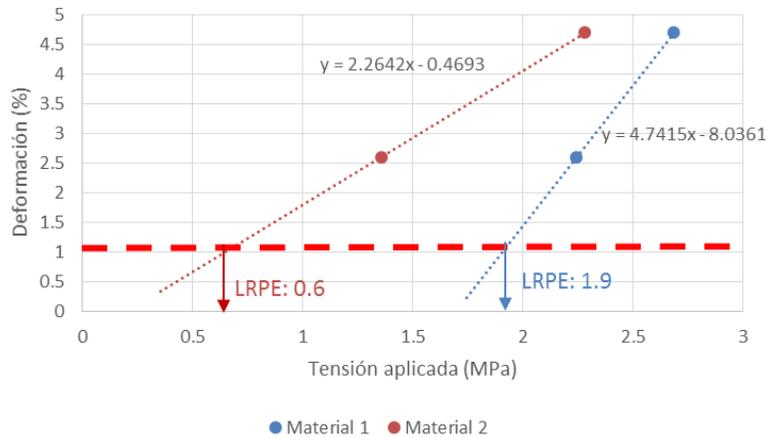


Figura A 26. Ejemplo de cálculo del límite de resistencia a punzonamiento estático para dos materiales distintos.

El último parámetro obtenido de este tipo de análisis es el coeficiente de punzonamiento (η). Este se determina a partir de una regresión lineal sobre los valores de velocidad de deformación con respecto a la carga aplicada. El coeficiente de punzonamiento será el valor de la pendiente de dicha función lineal. Este parámetro representa la capacidad que tiene un material a resistir deformaciones por punzonamiento: a mayor coeficiente, mayor resistencia del material.

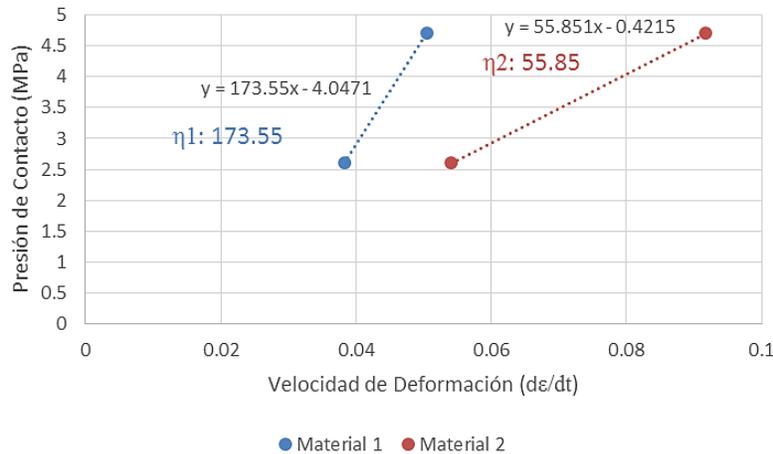


Figura A 27. Ejemplo de cálculo del coeficiente de punzonamiento.

A.5.2 Ensayo de Impacto Dinámico UGR-PADpt (University of Granada – Port Asphalt Dynamic Punching Test)

A través de este ensayo se logra evaluar la susceptibilidad de los materiales bituminosos a deformarse/dañarse por las tensiones puntuales producidas por el punzonamiento causado por el impacto de una carga dinámica procedente de la manipulación de mercancías (descenso desde los vehículos o grúas hasta el pavimento) o la caída desde altura de piezas, en determinadas zonas de puertos (o aeropuertos). El ensayo se lleva a cabo sobre el material bituminoso compactado, aplicando una carga dinámica de impacto controlada. Tras ello, se valora la resistencia a pérdidas del material ante una serie de impactos de alta tensión, así como su indentación, de modo que puede analizarse su comportamiento estructural en un pavimento portuario o aeroportuario.



Figura A 28. Dispositivo de ensayo para punzonamiento de impacto dinámico.

Para la realización del ensayo se fabricaron dos mezclas de cada tipología. Las probetas empleadas son análogas a las usadas en la evaluación del punzonamiento estático de 300 x 300 x 60 mm y compactadas con compactador de placa vibratorio. El ensayo consiste en la aplicación de una serie de cargas de impacto dinámico (asociada a los valores de carga medios en el pavimento portuario, en función de su uso), en la zona central de la probeta a ensayar. El resultado se debe obtener a partir del desarrollo del fenómeno de punzonamiento dinámico en dicha zona central, el cual provocará su deformación por indentación, así como la eventual pérdida o disgregación de material y/o la aparición de fisuras. De esta forma, a lo largo del ensayo se registran los valores de indentación producidos.

La máquina a utilizar para este método consiste en una maza situada sobre un brazo de una longitud de 1,5 m (con una masa total del sistema de 25 kg), que oscila de forma circular sobre una rótula anclada a un pórtico de apoyo (Figura A 28). Este sistema permite aplicar un impacto de fuerza controlada sobre la probeta (similar al ocurrido durante las operaciones de descarga de los contenedores en los puertos), cuya intensidad dependerá de la altura de caída de la maza. Por su parte, el cabezal de carga tiene una geometría y dimensiones similares las de a las de las patas de los contenedores (Figura A 29).



Figura A 29. Cabezal de carga empleado en el ensayo de punzonamiento dinámico.

Para evitar la influencia del suelo soporte en la medida, el equipo de ensayo consta de una base sobre la que se colocará el dispositivo de sujeción (con unas escuadras que eviten su desplazamiento lateral durante los impactos), compuesta por una manta de poliestireno de 2 cm de espesor, y una losa de hormigón de alta resistencia (de 500 x 500 mm de base), apoyada sobre cuatro patas de caucho normalizado. Dentro del dispositivo de sujeción, se sitúa la probeta fabricada de manera que esta se encuentra confinada durante el ensayo.

Tras colocar la probeta en el dispositivo de sujeción y centrar este respecto del pórtico de aplicación de carga, se aplican una serie de 30 impactos de carga dinámica (sin dejar más de 30 segundos entre un impacto y el siguiente), cuya intensidad variará en función de las condiciones a reproducir. Para ello, la maza se elevaba hasta que el vástago forme un cierto ángulo con la horizontal. A mayor ángulo, mayor altura de caída y, por tanto, mayor fuerza de impacto. En la tabla se incluyen las distintas condiciones reproducidas:

Tabla A 1. Condiciones de carga evaluadas.

Ángulo de Inclinación (°)	Fuerza aproximada de Impacto (N)	Situación Simulada
30	70	Impacto de 2 patas de contenedor de 14000 kg tras movimiento pendular de 2 °
45	245	Impacto de 4 patas contenedor de 14000 kg con una altura de caída de 1 cm.
60	500	Impacto de 2 patas de contenedor de 14000 kg, con 2 patas apoyadas y un ángulo de inclinación 5° con el pavimento.

De acuerdo a estas condiciones, se realizaron dos ensayos, uno en el que los 30 impactos eran realizados al nivel de carga intermedio y otro, en el que se realizaron 10 impactos a cada nivel de carga de manera creciente, con el objetivo de analizar el comportamiento del material a fatiga.

Dentro de los parámetros analizados, se evalúa en primer lugar la Profundidad de penetración. Dicho parámetro, se expresa en mm y se representará en una gráfica (Figura A 30) donde el eje de abscisas recoge el número de impactos aplicados al material, y el de ordenadas la profundidad de penetración acumulada media con cada impacto de la maza.

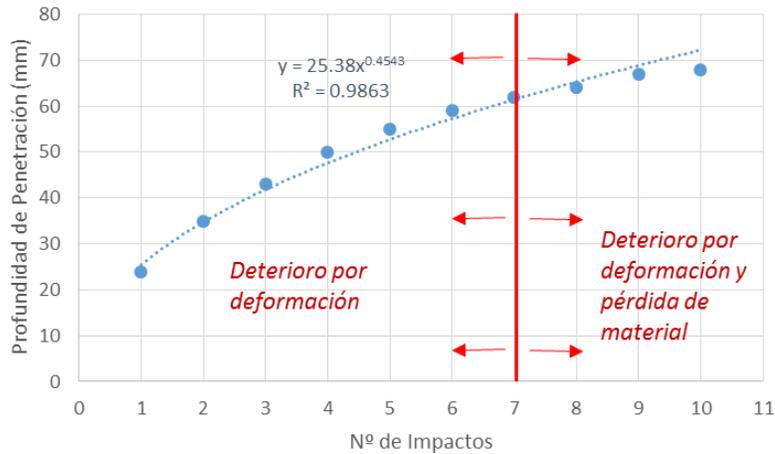


Figura A 30. Ejemplo de resultados ensayo impacto dinámico.

Por otra parte, se calcula la Vida hasta punzonamiento dinámico (Nf), esta se estima en base al ajuste de las representaciones gráficas de la profundidad de penetración. En este sentido, la vida hasta punzonamiento dinámico será el número de impactos más bajos (Nf) de los definidos para determinar una profundidad de punzonamiento acumulada determinada.