

**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



ESCUELA DE DOCTORADO DE LA UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA CIVIL

**TESIS DOCTORAL**

**Utilización de residuos para reducir el consumo de  
recursos naturales en la producción de mezclas  
bituminosas**

**PHD THESIS**

**Use of waste materials to reduce the consumption of  
natural resources in asphalt mixtures production**

Autor

**ISRAEL RODRÍGUEZ FERNÁNDEZ**

Directores

Dr. Daniel Castro Fresno

Dr. Moisés Bueno Pacheco

**Santander 2019**



## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero expresar mi agradecimiento a Daniel Castro, por haber confiado en mí para realizar esta tesis doctoral permitiéndome formar parte del Grupo de Investigación de Tecnología de la Construcción (GITECO), y por todo el apoyo y ayuda prestada como director de tesis durante todo este tiempo.

Por supuesto, quiero extender este agradecimiento a Moisés Bueno, por haberme permitido desarrollar parte de mi tesis doctoral bajo su responsabilidad durante la estancia predoctoral, y por todos los consejos y la ayuda prestada desde su incorporación como director de tesis.

Agradecer al Ministerio de Educación, Cultura y Deporte del Gobierno de España por proporcionarme la financiación necesaria para llevar a cabo esta tesis doctoral a través de la concesión de la ayuda para la Formación de Profesorado Universitario (FPU14/06997). También que agradecer la financiación recibida a través del proyecto AlterPave, financiado por el *European Union's Seventh Framework Programme for research, technological development and demonstration* (ref. nº 1109806.0006).

Agradecer a todos los miembros del *Road Engineering Laboratory* del Empa (*Swiss Federal Laboratories for Material Science and Technology*) por acogerme durante la realización de mi estancia predoctoral y permitirme participar en el proyecto de colaboración científico-industrial *Innovative Manufacturing of Crumb Rubber Modified Asphalt Concrete* (Innosuisse 25880.1 PFIW-IW).

También quiero mostrar mi agradecimiento a todos mis compañeros de GITECO, por todo el apoyo y por todos los buenos momentos que hemos pasado durante estos años, y a todas las personas que de una forma u otra han contribuido a que este trabajo haya sido posible.

Por último, quiero dar las gracias a mis padres por todos los sacrificios que han hecho para que yo pueda llegar hasta aquí; a mi hermano porque siempre ha cuidado de mí; y a Ana María, por su cariño y apoyo incondicional.



## RESUMEN

Garantizar la sostenibilidad en el consumo de recursos naturales es hoy en día uno de los mayores retos a los que se enfrenta la sociedad. El modelo tradicional de extracción, fabricación, utilización y eliminación ya solo sirve para empeorar el problema, y es por tanto inevitable un cambio hacia modelos que apuesten por un desarrollo más sostenible a largo plazo.

Para ello, tomando como ejemplo a la propia naturaleza, cada vez va ganando más importancia el modelo de economía circular. Lograr una economía sostenible, eficiente en el uso de recursos y competitiva requiere de una transición a una economía más circular, en la cual el valor de los productos, los materiales y los recursos se mantenga en la economía durante el mayor tiempo posible, y en la que se reduzca al mínimo la generación de residuos.

Esta problemática no es ni mucho menos ajena al sector de las carreteras. Estas infraestructuras son una parte fundamental para el desarrollo social y económico de cualquier territorio, y su extensión por todo el mundo está en continuo crecimiento. Sin embargo, su construcción y mantenimiento trae asociado un enorme consumo de recursos naturales, los cuales, además, no son renovables en el corto y medio plazo.

En este contexto, la investigación realizada en esta tesis doctoral se ha enfocado en evaluar alternativas a ese consumo de recursos naturales, y en particular, a los utilizados en la fabricación de mezclas bituminosas. Para ello, las actividades llevadas a cabo se centran, por un lado, en sustituir a los áridos naturales por soluciones más sostenibles, y por otro, en reducir el uso de ligantes derivados del petróleo favoreciendo su reciclaje.

De esta manera, el reciclaje del propio asfalto se posiciona como la principal alternativa a tener en cuenta ya que su reciclado supone un aporte a la mezcla tanto de áridos como de ligante. Otras opciones pasan por el uso de residuos, como pueden ser las escorias siderúrgicas o el caucho de neumáticos usados, con el doble beneficio de, por un lado, reducir la explotación de recursos naturales, y por otro, darles una salida medioambientalmente más respetuosa.

Bajo estas premisas, en la primera fase de la investigación se han diseñado en laboratorio diferentes mezclas bituminosas combinando distintos materiales alternativos. En concreto, se han utilizado dos tipos diferentes de escoria de acería (escoria negra y escoria LD), arena de moldeo y fresado. Utilizando estos materiales, se ha conseguido validar en laboratorio mezclas con una tasa de sustitución de los áridos de hasta el 98%, incorporando únicamente áridos naturales en la fracción del polvo mineral.

Por otro lado, el reciclado del betún contenido en el fresado se ha utilizado como alternativa para reducir la cantidad de betún virgen utilizado. Para ello, se ha recurrido al uso de aditivos, los cuales han manifestado tener un efecto positivo sobre la reología del betún envejecido. En las mezclas desarrolladas, el uso de fresado junto con los aditivos ha permitido reducir significativamente la cantidad de ligante utilizado. De esta forma, en algunas mezclas se han conseguido reducciones en el betún virgen de hasta el 40% con respecto de la mezcla de referencia, manteniendo un comportamiento mecánico adecuado.

En un segundo estudio, otra alternativa a los betunes convencionales evaluada en esta tesis ha sido la utilización de polvo de caucho procedente de neumáticos usados. En este caso, con el uso de este producto no se ha buscado sustituir al betún, sino mejorar sus prestaciones. De esta forma, se consigue una alternativa más económica para los betunes convencionales modificados con polímeros, a la par que se consigue dar una salida más respetuosa con el medioambiente a los neumáticos usados en comparación, por ejemplo, con su depósito en vertedero o con la incineración de los mismos.

Utilizando el procedimiento por vía seca se ha visto como mediante la incorporación de polvo de caucho en mezclas fabricadas con betún convencional es posible alcanzar un comportamiento, en determinados ensayos de laboratorio, similar al de una mezcla de referencia fabricada con betún modificado. En este sentido, el tiempo de contacto entre las partículas de caucho y el betún a alta temperatura se ha manifestado como una variable muy importante durante la fase de diseño, influenciada, además, por el tipo y contenido de polvo de caucho utilizado.

Un último aspecto fundamental que ha sido evaluado en esta investigación pasa por garantizar la reciclabilidad de las diferentes mezclas desarrolladas. En este sentido, todas las novedades introducidas hacen que al final de la vida útil del pavimento, el resultado sea un fresado con características diferentes a las de un fresado convencional. Por ello, en la fase de diseño se debe cuidar especialmente estos aspectos, teniendo en cuenta las peculiaridades tanto del betún como de los áridos contenidos en ese fresado.

Todas estas posibilidades manifiestan que es posible avanzar hacia un modelo de producción de mezclas bituminosas con menor dependencia de los recursos naturales, donde cada vez se apueste más por el reciclaje del asfalto y por la utilización de residuos. Con este objetivo, la investigación recogida en esta tesis doctoral, mediante resultados experimentales, trata de aportar mayor confianza sobre las distintas alternativas, poniendo en valor esa necesidad de cambio hacia un modelo eficiente en el uso del recurso, respetuoso con el medioambiente y que aporte el mayor valor añadido posible a la sociedad.

## ABSTRACT

Ensuring sustainability in the consumption of natural resources is one of the greatest challenges society is facing today. The traditional model of extraction, manufacture, use and disposal only serves to worsen the problem, and a shift towards solutions that guarantee a more sustainable development in the long term is therefore pressing.

To this end, taking nature itself as an example, the circular economy model is gaining more and more importance. Achieving a sustainable, resource-efficient and competitive economy therefore requires an evolution to a more circular economy, in which the value of products, materials and resources is held within the economy for as long as possible, and in which waste generation is minimized.

This problem is very relevant for the road sector also. These infrastructures are an essential part for the social and economic development of any country, and their extension all over the world is in continuous growth. However, their construction and maintenance requires an enormous consumption of natural resources, which, are not renewable in the short and medium term.

In this context, the research carried out in this doctoral thesis has focused on seeking alternatives to the consumption of natural resources, and in particular, to those used in the manufacture of asphalt mixtures. To this end, the activities carried out focus, on the one hand, on substituting natural aggregates with more sustainable alternatives and, on the other, on reducing the use of petroleum-based binders by favouring their recycling.

In this way, the use of reclaimed asphalt pavement (RAP) is positioned as the main alternative to be taken into account. This material contributes to the mixture with both aggregates and binders. Other options include the use of waste, such as steel slag or rubber from used tyres, with the double benefit of, on the one hand, reducing the use of natural resources and, on the other, giving these materials a more environmentally friendly treatment.

Under these premises, different asphalt mixtures have been designed combining different alternative materials. During the first stage of the investigation, specifically, two different types of steel slags, one type of foundry sand and one type of RAP have been used. The technical feasibility of using asphalt mixtures with a natural aggregate replacement up to 98% was demonstrated at the laboratory level, using only natural aggregates in the mineral powder fraction.

On the other hand, recycling of the aged bitumen contained in the RAP has been used as an alternative to reduce the amount of virgin bitumen used. For this purpose, specific additives have been used. These products have been shown to have a positive effect on the rheology of aged bitumen. In the asphalt mixtures, the use of RAP together with additives has significantly reduced the amount of virgin binder used. Thus, in some cases, reductions in virgin bitumen of up to 40% have been achieved with respect to the reference mix, while maintaining adequate mechanical performance.

In a second experimental stage, another alternative to conventional bitumen evaluated has been the use of crumb rubber modification. In this case, the use of this product has not sought to replace bitumen, but to improve its performance. In this way, a more economical alternative to conventional polymer modified bitumen is achieved, while wasted tyres are treated in a more environmentally friendly way, compared, for example, to their landfill or to their incineration.

Using the dry process, it has been seen how the incorporation of crumb rubber in mixtures made with conventional bitumen makes it possible to achieve a performance, in certain laboratory tests, similar to that of a reference mixture made with polymer modified bitumen. In this sense, the contact time between the rubber particles and bitumen at elevated temperature is a very important variable during the design phase, influenced, in addition, by the type and content of crumb rubber used.

A last fundamental aspect that has been evaluated in this research is to ensure the recyclability of the different mixtures developed. In this sense, all the new features introduced mean that at the end of the pavement's useful life, the result is a RAP with different characteristics to those of conventional RAP. For this reason, special care must be taken in the design phase, taking into account the peculiarities of both the bitumen and the aggregates contained in this RAP.

The solutions presented in this work, show that it is possible to manufacture asphalt mixtures with less dependence on virgin materials. Recycling asphalt and using waste should be-come more and more common practice. This document aims to give more confidence in the use of these alternatives and to highlight the need to change towards materials solutions that are efficient in the use of the resource, respectful of the environment and that contributes to the greatest possible added value to society.

## TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	I
RESUMEN .....	III
ABSTRACT .....	V
TABLA DE CONTENIDO .....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XI
ÍNDICE DE TABLAS .....	XV
CAPÍTULO I - INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. NORMATIVA DE REFERENCIA.....	3
1.2. ANTECEDENTES .....	4
1.3. OBJETIVOS.....	7
1.4. ESTRUCTURA DE LA TESIS .....	8
CAPÍTULO II – ESTADO DEL ARTE.....	9
2.1. LOS RECURSOS NATURALES Y LA PRODUCCIÓN DE RESIDUOS .....	11
2.2. RESIDUOS COMO MATERIALES ALTERNATIVOS A EMPLEAR EN LA FABRICACIÓN DE MEZCLAS BITUMINOSAS .....	15
2.2.1. Residuos y subproductos de la industria siderúrgica. ....	15
2.2.2. Fresado.....	35
2.2.3. Neumáticos al final de su vida útil (NFU).....	45
CAPÍTULO III – MATERIALES Y METODOLOGÍA.....	59
3.1. ESTUDIO DE LA UTILIZACIÓN DE RESIDUOS INDUSTRIALES Y FRESADO EN MEZCLAS BITUMINOSAS .....	61
3.1.1 Residuos y subproductos de la industria siderúrgica .....	61
3.1.2. Fresado.....	67
3.1.3. Áridos naturales .....	69
3.1.4. Ligantes y aditivos .....	70
3.1.5. Tipo y composición de las mezclas bituminosas desarrolladas .....	70
3.1.6. Metodología de fabricación de las mezclas bituminosas en laboratorio.....	77
3.1.7. Análisis de la influencia de los aditivos utilizados en las propiedades del betún.....	78
3.1.8. Estudio de la mezcla y obtención de la fórmula de trabajo .....	81
3.1.9. Evaluación del comportamiento de la mezcla ante sollicitaciones dinámicas .....	85
3.1.10. Estudio de la reciclabilidad de las mezclas desarrolladas.....	88

3.2. ESTUDIO DE MEZCLAS BITUMINOSAS MODIFICADAS POR VÍA SECA CON POLVO DE NEUMÁTICOS AL FINAL DE SU VIDA ÚTIL (NFU) .....	91
3.2.1. Polvo de neumáticos al final de su vida útil (NFU).....	91
3.2.2. Áridos naturales .....	92
3.2.3. Ligantes y aditivos .....	93
3.2.4. Influencia del tiempo de acondicionamiento en las propiedades del betún.	93
3.2.5. Tipo y composición de las mezclas bituminosas desarrolladas .....	94
3.2.6. Metodología de fabricación de las mezclas bituminosas en laboratorio.....	95
3.2.7. Análisis de la influencia del tiempo de acondicionamiento en el comportamiento mecánico de la mezcla .....	96
3.2.8. Estudio de la integración de las partículas de polvo de NFU en la mezcla bituminosa utilizando microscopia electrónica de barrido ambiental (ESEM) .....	96
3.2.9. Análisis del envejecimiento y la reciclabilidad de las mezclas modificadas con polvo de NFU.....	97
3.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS .....	99
 CAPÍTULO IV – RESULTADOS .....	 101
4.1. ESTUDIO DE LA UTILIZACIÓN DE RESIDUOS INDUSTRIALES Y FRESADO EN MEZCLAS BITUMINOSAS .....	103
4.1.1. Análisis de la influencia de los aditivos utilizados en las propiedades del betún.....	103
4.1.2. Estudio de la mezcla y obtención de la fórmula de trabajo .....	110
4.1.3. Evaluación del comportamiento de la mezcla ante sollicitaciones dinámicas .....	121
4.1.4. Estudio de la reciclabilidad de las mezclas desarrolladas.....	128
4.2. ESTUDIO DE MEZCLAS BITUMINOSAS MODIFICADAS POR VÍA SECA CON POLVO DE NEUMÁTICOS AL FINAL DE SU VIDA ÚTIL (NFU) .....	137
4.2.1. Influencia del tiempo de acondicionamiento en las propiedades del betún	137
4.2.2. Análisis de la influencia del tiempo de acondicionamiento en el comportamiento mecánico de la mezcla .....	140
4.2.3. Análisis de la integración de las partículas de polvo de NFU en la mezcla bituminosa utilizando microscopia electrónica de barrido ambiental (ESEM) ...	145
4.2.4. Estudio del envejecimiento y de la reciclabilidad de las mezclas desarrolladas .....	148
 CAPÍTULO V - CONCLUSIONES.....	 155
5.1. CONCLUSIONES.....	157
5.1.1. Conclusiones particulares del estudio de la utilización de residuos industriales y fresado en mezclas bituminosas .....	157
5.1.2. Conclusiones particulares del estudio de mezclas bituminosas modificadas por vía seca con polvo de neumáticos al final de su vida útil (NFU) .....	160

CHAPTER V - CONCLUSIONS .....	163
5.1. CONCLUSIONS .....	165
5.1.1. Particular conclusions of the study on the use of alternative materials in asphalt mixtures .....	165
5.1.2. Particular conclusions of the study of crumb rubber modified asphalt concrete using the dry process .....	167
CAPÍTULO VI – LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS .....	171
6.1. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS .....	173
CAPÍTULO VII - REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	175
7.1. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	177
7.2. NORMAS UTILIZADAS .....	190



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Tipos de escorias siderúrgicas .....	15
Figura 2-2. Coste de producción de mezcla bituminosa en función del contenido de fresado [81].....	36
Figura 2-3. Partículas de polvo de NFU generadas mediante distintos procedimientos. SEM análisis. Barra de escala de 200 $\mu\text{m}$ . Adaptado de [126].....	52
Figura 3-1. Aspecto de la escoria negra .....	64
Figura 3-2. Aspecto de la escoria LD .....	65
Figura 3-3. Aspecto de la arena de moldeo .....	66
Figura 3-4. Granulometría del fresado .....	67
Figura 3-5. Aspecto del fresado.....	68
Figura 3-6. Aspecto de los áridos naturales.....	69
Figura 3-7. Huso granulométrico AC16 S.....	71
Figura 3-8. Composición volumétrica de los áridos de la mezcla de referencia .....	72
Figura 3-9. Granulometría de la mezcla de referencia .....	72
Figura 3-10. Composición volumétrica de los áridos de la mezcla 1 .....	74
Figura 3-11. Composición volumétrica de los áridos de la mezcla 2.....	74
Figura 3-12. Composición volumétrica de los áridos de la mezcla 3.....	75
Figura 3-13. Composición volumétrica de los áridos de la mezcla 4.....	75
Figura 3-14. Composición volumétrica de los áridos de la mezcla 5.....	76
Figura 3-15. Composición volumétrica de los áridos de la mezcla 6.....	76
Figura 3-16. Esquema del ensayo de determinación del módulo complejo y el ángulo de fase en betunes (AASHTO T 315).....	79
Figura 3-17. Esquema del ensayo MSCR (AASHTO TP 70) .....	80
Figura 3-18. Composición volumétrica de los áridos de la mezcla utilizada en el estudio de reciclabilidad .....	89
Figura 3-19. Imágenes de las partículas de polvo de NFU. (ESEM) .....	92
Figura 3-20. Granulometría de la mezcla SDA 4 .....	94
Figura 4-1. Curvas maestras de módulo complejo ( $G^*$ ).....	104
Figura 4-2. Diagrama de Black a diferentes temperaturas de ensayo.....	105
Figura 4-3. Resultados del ensayo MSCR. Valores del parámetro $J_{nr}$ .....	106
Figura 4-4. Resultados del ensayo MSCR. Valores del parámetro R.....	106
Figura 4-5. Resultados del ensayo Linear Amplitude Sweep (LAS) test. ....	108
Figura 4-6. Resultados del ensayo Linear Amplitude Sweep (LAS) test. Ciclos hasta el fallo para un 5% de deformación.....	109
Figura 4-7. Contenido de ligante de las mezclas bituminosas (% v/v).....	111
Figura 4-8. Propiedades volumétricas de las mezclas bituminosas. Densidad.....	112

Figura 4-9. Propiedades volumétricas de las mezclas bituminosas. Huecos en mezcla .....	112
Figura 4-10. Dosificaciones seleccionadas para analizar la influencia de la arena de moldeo en el contenido de ligante .....	113
Figura 4-11. Comparación del contenido de ligante entre mezclas con arena de moldeo y mezclas con arena caliza.....	114
Figura 4-12. Resultados del ensayo de compactabilidad con máquina giratoria.....	114
Figura 4-13. Resultados del ensayo Marshall. Estabilidad.....	116
Figura 4-14. Resultados del ensayo Marshall. Deformación.....	116
Figura 4-15. Resultados del ensayo Marshall. Cociente Marshall .....	116
Figura 4-16. Resultados del ensayo de sensibilidad al agua.....	118
Figura 4-17. Resultados del ensayo de sensibilidad al agua. Valores de resistencia a tracción indirecta en función del tipo de aditivo utilizado .....	118
Figura 4-18. Resultados del ensayo de rodadura. Pendiente de deformación .....	119
Figura 4-19. Resultados del ensayo de rodadura. Deformación total.....	119
Figura 4-20. Clasificación de las mezclas según la puntuación asignada .....	121
Figura 4-21. Resultados del ensayo de rigidez. Valores de módulo dinámico.....	122
Figura 4-22. Resultados del ensayo de rigidez. Valores de ángulo de fase.....	123
Figura 4-23. Resultados del ensayo de fatiga. Curvas de fatiga.....	125
Figura 4-24. Resultados del ensayo de fatiga. Ratio de ciclos hasta rotura respecto de la mezcla de referencia .....	126
Figura 4-25. Contenido de ligante de las mezclas bituminosas (estudio de reciclabilidad) .....	129
Figura 4-26. Propiedades volumétricas de las mezclas bituminosas (estudio de reciclabilidad) .....	129
Figura 4-27. Resultados del ensayo Marshall (estudio de reciclabilidad).....	130
Figura 4-28. Resultados del ensayo de sensibilidad al agua (estudio de reciclabilidad) .....	131
Figura 4-29. Resultados del ensayo de rodadura (estudio de reciclabilidad).....	132
Figura 4-30. Resultados del ensayo de rigidez. Valores de módulo dinámico (estudio de reciclabilidad) .....	132
Figura 4-31. Resultados del ensayo de rigidez. Valores de ángulo de fase (estudio de reciclabilidad).....	133
Figura 4-32. Resultados del ensayo de fatiga. Curvas de fatiga (estudio de reciclabilidad) .....	134
Figura 4-33. Resultados del ensayo de fatiga. Ratio de ciclos hasta rotura respecto de la mezcla de referencia (estudio de reciclabilidad) .....	134
Figura 4-34. Resultados ensayo de viscosidad dinámica. Muestras con 10% de polvo de neumático.....	137
Figura 4-35. Resultados ensayo de viscosidad dinámica. Muestras con 15% de polvo de neumático.....	138

Figura 4-36. Propiedades volumétricas de las mezclas bituminosas modificadas con polvo de NFU .....	141
Figura 4-37. Resultados del ensayo Marshall.....	142
Figura 4-38. Resultados del ensayo de sensibilidad al agua.....	144
Figura 4-39. Imagen del estado de digestión de las partículas de caucho en la mezcla bituminosa (ESEM). 60 minutos de tiempo de acondicionamiento. Imagen 1 .....	146
Figura 4-40. Imagen del estado de digestión de las partículas de caucho en la mezcla bituminosa (ESEM). 60 minutos de tiempo de acondicionamiento. Imagen 2 .....	146
Figura 4-41. Imagen del estado de digestión de las partículas de caucho en la mezcla bituminosa (ESEM). 120 minutos de tiempo de acondicionamiento. Imagen 1 .....	147
Figura 4-42. Imagen del estado de digestión de las partículas de caucho en la mezcla bituminosa (ESEM). 120 minutos de tiempo de acondicionamiento. Imagen 2 .....	147
Figura 4-43. Propiedades volumétricas de las mezclas bituminosas modificadas con polvo de NFU (estudio de reciclabilidad).....	148
Figura 4-44. Resultados del ensayo Marshall (estudio de reciclabilidad).....	149
Figura 4-45. Resultados del ensayo de sensibilidad al agua (estudio de reciclabilidad) .....	150
Figura 4-46. Curvas maestras de módulo complejo ( $G^*$ ) (estudio de reciclabilidad)	152
Figura 4-47. Curvas maestras de módulo complejo ( $G^*$ ) (estudio de reciclabilidad). Mezcla de referencia.....	153
Figura 4-48. Curvas maestras de módulo complejo ( $G^*$ ) (estudio de reciclabilidad). Mezcla modificada con CR-A .....	153
Figura 4-49. Curvas maestras de módulo complejo ( $G^*$ ) (estudio de reciclabilidad). Mezcla modificada con CR-B .....	153



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Análisis sobre el lixiviado de la escoria. Valores máximos permitidos (mg/kg de materia seca).....	20
Tabla 2-2. Composición química de la escoria negra de horno de arco eléctrico. ....	21
Tabla 2-3. Composición química de la escoria LD. ....	28
Tabla 2-4. Composición química de distintos tipos de arena de moldeo (% en peso). 32	
Tabla 2-5. Objetivos del PEMAR 2016-2022 relativos a la gestión de los NFU.....	47
Tabla 2-6. Datos de producción y uso de neumáticos usados. ....	48
Tabla 2-7. Cantidades y usos de los NFU recogidos en España durante 2017.....	49
Tabla 3-1. Requisitos recogidos en el artículo 542 del PG-3 para el árido grueso.....	62
Tabla 3-2. Propiedades de la escoria negra .....	63
Tabla 3-3. Análisis del lixiviado de la escoria negra (mg/kg de materia seca) .....	64
Tabla 3-4. Propiedades de la escoria LD .....	64
Tabla 3-5. Análisis del lixiviado de la escoria LD (mg/kg de materia seca).....	65
Tabla 3-6. Propiedades de la arena de moldeo .....	66
Tabla 3-7. Propiedades de los áridos recuperados del fresado .....	67
Tabla 3-8. Propiedades del árido grueso recuperado del fresado .....	67
Tabla 3-9. Propiedades del betún recuperado del fresado .....	68
Tabla 3-10. Propiedades del árido ofítico.....	69
Tabla 3-11. Propiedades del árido calizo.....	69
Tabla 3-12. Propiedades del betún 50/70 .....	70
Tabla 3-13. Composición de los áridos de las mezclas experimentales (% v/v).....	73
Tabla 3-14. Granulometría de las mezclas bituminosas. Cernido acumulado (% v/v) 73	
Tabla 3-15. Composición de las muestras de betún ensayadas .....	78
Tabla 3-16. Requisitos para el ensayo Marshall (PG-3. Orden FOM/891/2004).....	83
Tabla 3-17. Límites establecidos por el PG-3 para el valor de la pendiente media de deformación ( $WTS_{AIRE}$ ) en el intervalo de 5.000 a 10.000 ciclos.....	85
Tabla 3-18. Criterios de asignación de puntuaciones para las mezclas desarrolladas..	86
Tabla 3-19. Propiedades de los betunes.....	93
Tabla 3-20. Métodos utilizados para ejecutar el análisis estadístico de los resultados	99
Tabla 4-1. Usos del betún en función del parámetro $J_{nr}$ (ensayo MSCR).....	107
Tabla 4-2. Puntuaciones asignadas a las mezclas.....	121
Tabla 4-3. Resultados del ensayo de fatiga .....	124
Tabla 4-4. Resultados del ensayo de fatiga. Estudio de reciclabilidad.....	133
Tabla 4-5. Parámetros de ajuste de los resultados de viscosidad dinámica del betún	138



## **CAPÍTULO I - INTRODUCCIÓN**



## **1.1. NORMATIVA DE REFERENCIA**

La presente tesis doctoral se articula como una tesis con mención internacional y se rige de acuerdo a las disposiciones generales definidas para realizar los estudios de Doctorado y la obtención del Título de Doctor de la Universidad de Cantabria. A su vez, la presente tesis se encuentra enmarcada dentro del Programa de Doctorado en Ingeniería Civil (PDIC), debiendo cumplir de igual manera con las disposiciones específicas definidas en dicho programa. A continuación se enumera la normativa vigente:

- Ley Orgánica 6/2001, de 21 de diciembre, de Universidades y sus normas de desarrollo, modificada por la Ley Orgánica 4/2007, de 12 de abril.
- Real Decreto 99/2011, de 28 de enero, por el que se regulan las enseñanzas oficiales de Doctorado.
- Real Decreto 195/2016, de 13 de mayo, por el que se establecen los requisitos para la expedición del Suplemento Europeo al Título Universitario de Doctor y se modifica el Real Decreto 99/2011.
- Estatutos de la Universidad de Cantabria, aprobados por Decreto 26/2012, de 10 de mayo (Boletín Oficial de Cantabria de 17 de mayo de 2012).
- Otras disposiciones sobre doctorado promulgadas por el Estado, adaptadas a la Universidad de Cantabria.
- Normativa de gestión académica de los estudios de doctorado regulados por el Real Decreto 99/2011, aprobada por el Consejo de Gobierno de la Universidad de Cantabria el 4 de marzo de 2015.

## 1.2. ANTECEDENTES

La red de carreteras es una parte fundamental en el desarrollo social y económico de cualquier territorio. Son muchos los factores que favorecen la expansión de la red de carreteras, desde aspectos de carácter económico, tales como la apertura de nuevas vías de comercio o la explotación de recursos naturales, propio de regiones en desarrollo, hasta aspectos de carácter social, propio en este caso de regiones desarrolladas, donde cualquier mejora en las condiciones de transporte redundaría en una mayor calidad de vida [1].

En cualquier caso, es evidente que una red de carreteras más extensa y de mayor calidad se traduce directamente en una mejora en la calidad de vida de los ciudadanos, dotando a los territorios de mayor accesibilidad, rapidez en los desplazamientos y seguridad. Es por eso, a medida que la sociedad ha ido evolucionando, la longitud y la calidad de la red de carreteras en el mundo no han dejado de crecer.

A modo de ejemplo, en España, según datos del Ministerio de Fomento [2], en 1970 la red nacional de carreteras estaba compuesta por un total de 139.212 km. Esta longitud se ha ido incrementando durante todos estos años hasta alcanzar los 165.438 km en 2016, lo que supone un crecimiento medio cercano al 19%. Pero no solo se ha incrementado la longitud, sino que la calidad de estas carreteras también ha ido mejorando. Entre los años 2001 y 2010, el número de kilómetros de autovía en España se incrementó en un 49%, pasando de 9.571 km a 14.262 km.

En los próximos años las estimaciones indican que ese crecimiento no cesará. Se estima que para el año 2050 se construirán 25 millones de kilómetros de nuevas carreteras en todo el mundo, lo que supone un incremento del 60% de la longitud total de carreteras existente en el año 2010, y que el 90% de estas carreteras se construirán en países en desarrollo, incluyendo regiones con un importante valor ecológico [1].

Esta situación, por tanto, hace que no se pueda dejar de considerar la sostenibilidad en todos sus términos, y en particular a la sostenibilidad ambiental. Promover que la construcción y el mantenimiento de las carreteras se hagan de una forma respetuosa con el medioambiente y garantizar la existencia de recursos naturales a largo plazo debe ser una prioridad, y así se manifestó en el año 2014 en la convocatoria “ERA-NET Plus Infravation” ([www.infravation.net](http://www.infravation.net)).

Esta convocatoria, en sintonía con las políticas europeas en la materia, nació con el objetivo de financiar proyectos de investigación que ayuden a avanzar hacia un sistema de transporte con menor impacto sobre el medioambiente, más eficiente en el uso de recursos naturales y con menor dependencia de los combustibles fósiles, todo esto, mediante el desarrollo de sistemas, materiales y técnicas avanzadas en la construcción y mantenimiento de infraestructura viaria.

A partir de este marco, y centrando el interés sobre la infraestructura, la convocatoria establecía siete retos, cada uno de ellos con un objetivo particular, destacando por su directa relación con esta tesis uno de ellos: Reducción de materiales naturales mediante sustitución o reciclaje. Abordando este reto y con la financiación de dicha convocatoria, nace el proyecto AlterPave ([www.alterpave.eu](http://www.alterpave.eu)). Este proyecto, coordinado por el grupo GITECO de la Universidad de Cantabria, es el origen de esta tesis doctoral y bajo el cual se desarrolla gran parte de la investigación recogida en este documento.

De esta manera, proyecto y tesis comparten el objetivo de valorar la viabilidad técnica del uso de materiales alternativos en la fabricación de mezclas bituminosas. A grandes rasgos, las actividades se centran, por un lado, en la sustitución de los áridos naturales por materiales alternativos, y por otro lado, en reducir el uso de ligantes derivados del petróleo, bien mediante el uso de alternativas más sostenibles, o bien favoreciendo su reciclaje.

De esta manera, la utilización de residuos se coloca como una de las principales alternativas a tener en cuenta para reducir el uso de recursos naturales. Tratar de incorporar una mayor tasa de asfalto reciclado en nuevas mezclas ha sido y continúa siendo uno de los mayores objetivos durante las últimas décadas, y su mayor implantación ha ido evolucionando de la mano con el desarrollo de aditivos que favorezcan la recuperación de las prestaciones del betún envejecido. Otras opciones pasan por el uso de residuos, tales como escorias siderúrgicas, residuos plásticos, cenizas o neumáticos usados, entre otros.

Manteniendo la reutilización de residuos en la fabricación de mezclas bituminosas como hilo conductor de esta tesis, llegado este punto es necesario introducir la otra gran componente de esta investigación. Fruto de la estancia de investigación realizada en el *Road Engineering / Sealing Components Laboratory (Empa, Suiza)*, surge la oportunidad de colaborar en el proyecto *Innovative Manufacturing of Crumb Rubber Modified Asphalt Concrete*.

Este proyecto, financiado por la administración suiza (*Innosuisse project 25880.1 PFIW-IW*), tiene un carácter eminentemente práctico al ser ejecutado en colaboración con empresas constructoras con el objetivo de introducir el uso del polvo de neumático usado en el mercado suizo de las mezclas bituminosas. Mediante este enfoque, se consigue el doble beneficio de valorizar los neumáticos usados a la vez que se le confiere a la mezcla una mejoría en sus prestaciones.

La financiación de este tipo de proyectos por instituciones públicas es un claro ejemplo que pone en evidencia la necesidad ya comentada anteriormente de garantizar la sostenibilidad ambiental de este tipo de infraestructuras, reconociendo que la naturaleza no es una fuente inagotable de recursos, siendo necesario su protección y uso racional. A este respecto, se presenta esta tesis doctoral con la seguridad de que todo el trabajo realizado servirá para acercarse un poco más hacia la consecución de esos objetivos.

### **1.3. OBJETIVOS**

El objetivo fundamental de esta tesis es desarrollar mezclas bituminosas que utilicen menor cantidad de recursos naturales, buscando en el reciclaje y en la valorización de residuos las alternativas para los mismos, y siempre con la finalidad de que, cuando alcancen el final de su vida útil, quede garantizada su reciclabilidad. De forma más específica, esta tesis tiene marcados los siguientes objetivos:

- Evaluar el comportamiento en laboratorio de mezclas bituminosas diseñadas con tasas elevadas de sustitución de los áridos por alternativas no convencionales. Para ello se diseñarán en laboratorio mezclas bituminosas incorporando residuos de la industria siderúrgica, de forma que se pueda evaluar su influencia en el comportamiento de la mezcla y la capacidad real para reemplazar a los materiales convencionales.
- Estudiar la posible reducción de la cantidad de betún convencional a utilizar en las mezclas bituminosas mediante la utilización de asfalto reciclado en combinación con aditivos rejuvenecedores. En base a unas propiedades volumétricas adecuadas se fijará una cantidad de betún, la cual se mantendrá fija durante la evaluación en laboratorio del comportamiento de la mezcla. Los resultados marcarán el potencial ahorro de ligante conseguido.
- Analizar la reciclabilidad de las mezclas bituminosas diseñadas utilizando altas tasas de materiales alternativos. Garantizar un posterior uso de las mezclas bituminosas desarrolladas es un objetivo fundamental en esta tesis. Para ello, las mezclas desarrolladas serán sometidas a un proceso de envejecimiento acelerado en laboratorio, de tal forma que posteriormente pueda ser evaluada su reincorporación a nuevas mezclas bituminosas.
- Evaluar el comportamiento en laboratorio de mezclas bituminosas modificadas por vía seca con polvo de neumáticos usados. A partir de la incorporación del polvo de neumático en la mezcla, se optimizará su diseño para satisfacer los requisitos normativos. En particular, se prestará especial atención a la influencia del tiempo de acondicionamiento sobre el comportamiento de la mezcla.
- Analizar el efecto del envejecimiento y la reciclabilidad de las mezclas modificadas con polvo de neumáticos usados. Nuevamente, es fundamental garantizar un posterior uso de estas mezclas bituminosas. En este caso, se evaluará la influencia del envejecimiento en el comportamiento de la mezcla y su posterior reciclabilidad.

## 1.4. ESTRUCTURA DE LA TESIS

En el documento de esta tesis se diferencian dos estudios que, aunque están relacionados, es necesario separar en su presentación para facilitar la comprensión de los mismos. Así, en algunos capítulos, el documento se divide en dos partes, encontrando por un lado la investigación llevada a cabo en el marco del proyecto AlterPave, el cual se ha denominado en este documento como “estudio de la utilización de residuos industriales y fresado en mezclas bituminosas”, y por otro lado, el estudio realizado durante la estancia en el Empa, el cual se ha denominado en este documento como “estudio de mezclas bituminosas modificadas por vía seca con polvo de neumáticos al final de su vida útil (NFU)”. Sabiendo que en algunos capítulos va a existir esta separación, el documento completo queda estructurado de la siguiente manera:

- ❖ Capítulo I. Introducción
- ❖ Capítulo II. Estado del arte
- ❖ Capítulo III. Materiales y metodología
- ❖ Capítulo IV. Resultados
- ❖ Capítulo V. Conclusiones
- ❖ Capítulo VI. Líneas de investigación futuras
- ❖ Capítulo VII. Referencias bibliográficas

Así, una vez vistos en este primer capítulo la normativa de referencia, los antecedentes que marcan el origen de esta tesis doctoral y los objetivos propuestos para esta investigación, en el segundo capítulo se continua haciendo un repaso del estado del arte, profundizando inicialmente en la problemática previamente introducida en el capítulo primero, para a continuación analizar el estado de la técnica en relación con las distintas soluciones valoradas en esta tesis.

En el capítulo tercero se detallan los materiales y la metodología utilizada para llevar a cabo cada uno de los estudios antes descritos, dividiéndose por tanto este capítulo en dos partes. De la misma forma, en el capítulo cuarto se recogen los resultados obtenidos y la discusión de los mismos, que dan paso al capítulo quinto donde se recogen las principales conclusiones extraídas de la investigación llevada a cabo.

Finalmente se muestran las potenciales líneas de investigación futuras en el capítulo sexto y se enumeran en el capítulo séptimo las referencias bibliográficas de todos los documentos citados a lo largo de esta tesis.

## **CAPÍTULO II – ESTADO DEL ARTE**



## 2.1. LOS RECURSOS NATURALES Y LA PRODUCCIÓN DE RESIDUOS

El actual modelo de producción y gestión de recursos, bienes y servicios asociado a la sociedad de consumo en la que vivimos, ha mostrado ser incompatible con la protección del medioambiente. El sistema lineal de la economía habitualmente utilizado de extracción, fabricación, utilización y eliminación ya no sirve sino para empeorar el problema y es necesario establecer otros sistemas que garanticen un desarrollo sostenible a largo plazo. Para ello, tomando como ejemplo a la propia naturaleza, las políticas europeas centran sus esfuerzos en la implantación del modelo de economía circular.

Según se recoge en la comunicación de la Comisión Europea publicada en 2015 bajo el título “Cerrar el círculo: un plan de acción de la UE para la economía circular” [3], la transición a una economía más circular, en la cual el valor de los productos, los materiales y los recursos se mantenga en la economía durante el mayor tiempo posible, y en la que se reduzca al mínimo la generación de residuos, constituye una contribución esencial a los esfuerzos de la UE encaminados a lograr una economía sostenible, hipocarbónica, eficiente en el uso de los recursos y competitiva.

Son varios los principios sobre los que descansa la economía circular [4]. Destacar, desde el punto de vista de la producción, algunos principios como la eco-concepción de los productos, donde se consideran desde la fase de diseño todos los impactos medioambientales a lo largo del ciclo de vida de los productos; la ecología industrial y territorial, donde la organización industrial en un mismo territorio se caracteriza por tener una gestión optimizada de los stocks y de los flujos de materiales, energía y servicios; o la economía de la funcionalidad, donde se privilegia el uso frente a la posesión, la venta de un servicio frente a la de un bien.

En relación con uso eficiente de los recursos, es posible destacar algunos principios como por ejemplo, el segundo uso, reintroduciendo en el circuito económico aquellos productos que ya no se corresponden a las necesidades iniciales de los consumidores; la reutilización de ciertos residuos o ciertas partes de los mismos que todavía pueden funcionar para la elaboración de nuevos productos; la reparación, encontrándole una segunda vida a los productos estropeados; el reciclaje de los materiales que se encuentran en los residuos; o la valorización, entendida ésta como la forma de aprovechar energéticamente los residuos que no se pueden reciclar.

En España, el concepto de economía circular se recoge en el Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022 [5]. En este documento se hace referencia a la Directiva Marco de Residuos (Directiva 98/2008/CE) y a “la hoja de ruta hacia una Europa eficiente en el uso de recursos” [6], las cuales establecen como uno de los grandes objetivos el convertir a Europa en una sociedad eficiente en el uso de los recursos, que produzca menos residuos y que utilice como recurso, siempre que sea posible, los que no pueden ser evitados. El propio PEMAR establece, en concordancia con lo dicho anteriormente, que en definitiva, se trata de sustituir una economía lineal basada en producir, consumir y desechar, por una economía circular en la que se reincorporen al proceso productivo una y otra vez los materiales que contienen los residuos para la producción de nuevos productos o materias primas.

En el contexto de las mezclas bituminosas, material objeto de estudio en esta tesis doctoral, algunos de estos principios de la economía circular son perfectamente aplicables. En concreto, en línea con los objetivos de esta investigación, el foco se centra en la reutilización y reciclaje de materiales no convencionales susceptibles de ser utilizados en la fabricación de mezclas bituminosas. En particular, el objetivo se centra sobre la validación de la funcionalidad técnica de estos materiales, buscando una alternativa sostenible a la explotación de los recursos naturales utilizados principalmente en las mezclas bituminosas: el petróleo, del que derivan los ligantes bituminosos, y los áridos naturales.

El consumo de áridos ya es hoy en día una de las emergencias ambientales con mayor importancia en relación con el consumo de recursos naturales. El caso particular de la explotación de áridos naturales es por definición no sostenible, tanto que se trata de un recurso no renovable a corto y medio plazo. Además, la producción de áridos se caracteriza por ser poco eficiente, generando gran cantidad de material residual [7].

En este sentido, es posible utilizar el término sostenibilidad entendiendo como explotación sostenible a aquella que es eficiente en el uso del recurso, respetuosa con el medioambiente y que aporta el mayor valor añadido a la sociedad. El mayor reto debe ser, por tanto, introducir estrategias de gestión que tengan en cuenta no solo los aspectos económicos, sino que integren también los aspectos medioambientales y sociales.

La explotación y el transporte de áridos, por su parte, también tienen asociados diferentes impactos medioambientales, especialmente a nivel local. Estas prácticas generan ruido y polvo, causan contaminación y afectan a la biodiversidad de la zona. Además, la apertura de una cantera implica que no se pueda destinar esa zona para otros usos, entrando en conflicto con otros intereses como puede ser la agricultura, la edificación o el ocio, intensificándose estos problemas en las regiones más pobladas [7,8].

En España, según datos publicados por la Asociación Nacional de Empresarios Fabricantes de Áridos (ANEFA) [9], durante el año 2017, el consumo de áridos en España por el sector de la construcción fue de 112 millones de toneladas. De este total, 106 millones de toneladas (94,6%) se correspondieron con áridos naturales, proviniendo únicamente 6 millones de toneladas (5,4%) de fuentes alternativas.

Entre estas fuentes alternativas predominan los 4,5 millones de toneladas de áridos procedentes de otras industrias extractivas que los producen como subproductos. Es muy destacable que el consumo de áridos reciclados se cifra únicamente en 1 millón de toneladas, representado únicamente un 0,9% del total de áridos consumidos. Con estos datos se pone de manifiesto la gran importancia que las explotaciones de áridos tienen en el sector de la construcción, y las pocas alternativas que actualmente existen para los mismos.

La construcción de carreteras es uno de los sectores con mayor consumo de áridos. En ese año 2017, este sector supuso en torno al 26,9% del consumo total de áridos naturales, con un consumo de unos 29,7 millones de toneladas. Por otro lado, teniendo en cuenta que, según datos publicados por la *European Asphalt Pavement Association (EAPA)* [10], la producción en España de mezclas bituminosas fue de 15,2 millones de toneladas es posible establecer que de los 29,7 millones de toneladas de áridos, aproximadamente unos 14,5 millones fueron empleados en la fabricación de mezclas bituminosas, poniendo de manifiesto la gran importancia que la fabricación de este material tiene en el consumo de este recurso.

En lo relativo a los ligantes bituminosos, su dependencia del petróleo hace que este también sea un recurso no renovable en el corto y medio plazo. No obstante, en este caso el impacto de la construcción de carreteras sobre la explotación del petróleo no es tan importante como en el caso de los áridos, lo cual implica que mientras otras industrias sigan dependiendo del petróleo, no existirá un problema crítico de escasez en los ligantes bituminosos [11].

Sin embargo, un aspecto muy importante de los ligantes derivados del petróleo es el impacto que estos generan sobre el coste total de la mezcla bituminosa y la incertidumbre que sobre su precio generan las fluctuaciones en el precio del crudo. El coste unitario del betún asfáltico ha experimentado durante los últimos años fuertes oscilaciones tanto al alza como a la baja. Además, otro aspecto fundamental del precio es el tipo de betún utilizado, encontrando grandes diferencias entre los betunes clasificados como convencionales y los betunes modificados con polímeros u otro tipo de aditivos [12].

Según datos de 2017, como orden de magnitud es posible establecer el precio de una tonelada de betún convencional en el entorno de los 350-400€ mientras que por ejemplo, un betún modificado con polímeros podría alcanzar los 450-500€ por tonelada. En este sentido, alternativas como la utilización del polvo de neumáticos usados se posiciona como una opción muy interesante. Distintas experiencias de los últimos años han demostrado que el polvo de caucho, como aditivo único o mayoritario empleado en la modificación de un betún asfáltico aporta numerosas ventajas técnicas, económicas y medioambientales que lo hacen competitivo respecto a otros productos [12].

A la vista de todo esto, parece evidente que en el sector de las mezclas bituminosas es necesario avanzar hacia el concepto de economía circular, tratando de implantar en este sector ciertas prácticas que hagan que el impacto en el medioambiente se reduzca y se garantice la sostenibilidad a largo plazo de las mezclas bituminosas. A lo largo de esta tesis se recogen distintas alternativas, todas ellas enfocadas hacia la reducción en el consumo de recursos naturales y hacia la reutilización y el reciclaje de diferentes residuos, centrando el estudio desde el punto de vista de la funcionalidad técnica de estos materiales dentro de la mezcla bituminosa.

## 2.2. RESIDUOS COMO MATERIALES ALTERNATIVOS A EMPLEAR EN LA FABRICACIÓN DE MEZCLAS BITUMINOSAS

En este apartado se hace un repaso de la situación actual de cada uno de los residuos y subproductos utilizados durante el desarrollo de esta tesis, con especial atención a su empleo en la fabricación de mezclas bituminosas. En cada caso, se analizan aspectos relacionados con la producción, legislación pertinente y propiedades físicas y químicas de cada material, para posteriormente hablar sobre el uso que se le ha dado tradicionalmente a estos materiales dentro del ámbito de las mezclas bituminosas, las peculiaridades que pudieran existir en cada caso y la influencia que pudieran tener sobre el desempeño de las mezclas resultantes, tanto en términos de comportamiento mecánico como en el aspecto medioambiental.

### 2.2.1. Residuos y subproductos de la industria siderúrgica.

Uno de los sectores de producción que genera residuos y subproductos susceptibles de ser utilizados como árido en la producción de mezclas bituminosas es el sector de la industria siderúrgica. Dentro de este sector es posible diferenciar entre distintos tipos de residuos y subproductos cuyas propiedades van a estar condicionadas por diversos factores, como pueden ser el tipo de materia prima utilizada o el proceso dentro de la cadena de producción donde se generen. Uno de los residuos con mayor aplicación en el ámbito de las mezclas bituminosas son las escorias siderúrgicas, las cuales, según EUROSLAG [13], se pueden clasificar como se muestra en la siguiente figura.

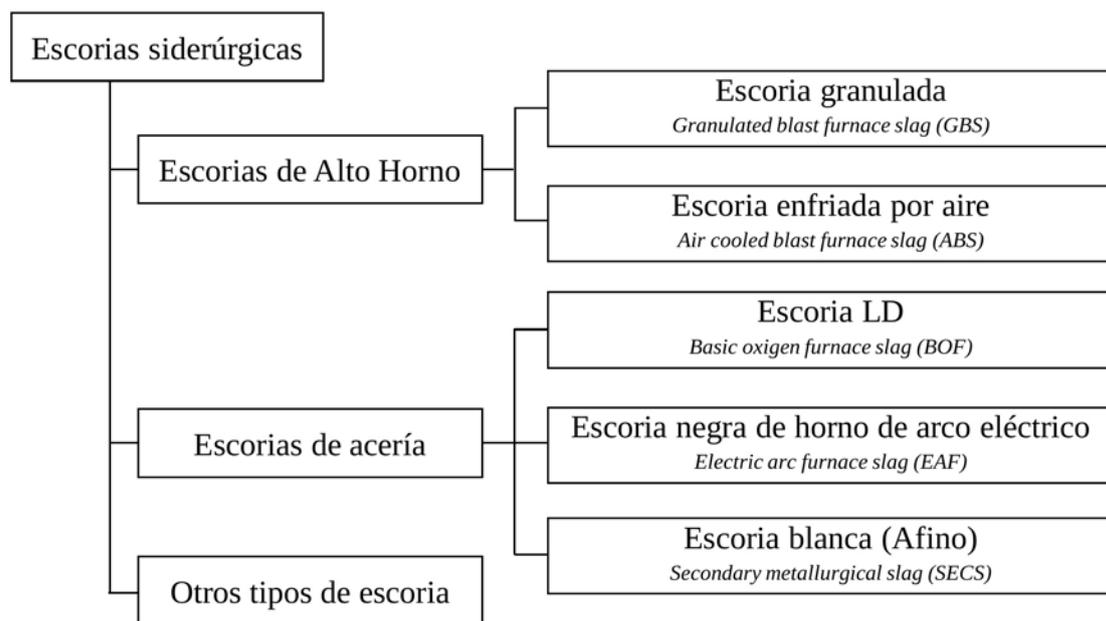


Figura 2-1. Tipos de escorias siderúrgicas

Por su especial interés, en lo que a escoria se refiere, esta tesis se centra en la utilización de las escorias de acería en mezclas bituminosas, y en particular en el uso de la escoria LD y de la escoria negra de horno de arco eléctrico. Según datos de EUROSLAG [14], a la producción de 138,2 millones de toneladas de acero bruto se le asocia la producción de 18,4 millones de toneladas de escoria, de las cuales un 56,6% se corresponden con escoria negra y un 32,2% con escoria LD (datos recopilados de diferentes países europeos). Extrapolando estos datos, a la producción de 162 millones de toneladas de acero bruto producidas conjuntamente por los 28 países de la Unión Europea en 2016, podría asociarse una producción de 22 millones de toneladas de escoria.

En cuanto al uso que se le dio a las escorias de acería durante ese año 2016, destacar que un 46,0% se utilizaron en la construcción de carreteras, un 31,3% se reutilizaron en otros sectores (industria del hormigón, obras hidráulicas, industria metalúrgica, etc.) y el restante 22,7% se almacenó (8,6%) o bien se retiró a vertedero (14,1%). A la vista de estos datos, comparado con el consumo de áridos para la fabricación de mezclas bituminosas, que ya solo en España superaba los 14 millones de toneladas, es evidente que, garantizando su viabilidad, existe el potencial para que todas las escorias generadas puedan ser reutilizadas y no sea necesario su traslado a vertedero.

Otro residuo generado por la industria siderúrgica susceptible de utilizarse en la fabricación de mezclas bituminosas es la arena de moldeo. Según datos publicados en la web del proyecto ECO-SANDFILL [15], en Europa se generan anualmente en torno a 9 millones de toneladas de residuo de arena de moldeo, de las cuales solamente un 25% son reutilizadas en nuevas aplicaciones, llevándose a vertedero el 75% restante. Al igual que para las escorias, abrir la puerta a la reutilización de este material en mezclas bituminosas, profundizando en su estudio y validando su aptitud, supondría una importante reducción de la cantidad llevada a vertedero.

Sin embargo, para que la implantación de estos materiales sea real y efectiva, es necesario que exista una normativa que regule todos los aspectos relacionados con estas prácticas y que sea garantía de su viabilidad técnica y medioambiental. En este sentido, a nivel normativo, desde un punto de vista estrictamente técnico, el uso de estos subproductos en la producción de mezclas bituminosas no cuenta en España con una regulación específica a nivel nacional. Sin embargo, el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) [16], en su artículo 542.2.3, establece la posibilidad de utilizar este tipo de subproductos como árido cuando dice que “Los áridos a emplear en las mezclas bituminosas podrán ser de origen natural, artificial o reciclado siempre que cumplan las especificaciones recogidas en este artículo”.

Si bien es cierto que esta frase abre la puerta al uso de subproductos en mezclas bituminosas, en ese mismo artículo, el PG-3 establece que “Los áridos no serán susceptibles a ningún tipo de meteorización o alteración fisicoquímica apreciable bajo las condiciones más desfavorables que, presumiblemente, puedan darse en la zona de empleo. Se debe garantizar tanto la durabilidad a largo plazo, como que no originen con el agua disoluciones que puedan causar daños a estructuras u otras capas del firme, o contaminar corrientes de agua”.

Esta frase establece un límite a la utilización de cualquier material; sin embargo, no se establece ningún requisito en particular, sino que se establece que “Por ello, en materiales en los que, por su naturaleza, no exista suficiente experiencia sobre su comportamiento, deberá hacerse un estudio especial sobre su aptitud para ser empleado, que deberá ser aprobado por el Director de las Obras”. Con todo ello no solo es necesario que el subproducto seleccionado cumpla con las especificaciones marcadas por el PG-3 como si de un árido más se tratase sino que, en algunos casos, donde no exista una experiencia suficientemente probada, será necesario garantizar que también se cumplan estas directrices generales.

A nivel autonómico, la creciente importancia que ha ido cobrando la gestión responsable de los residuos a causa de la mayor concienciación ambiental que ha ido tomando la sociedad ha provocado que algunos organismos, especialmente en aquellos territorios donde la producción de este tipo de residuos tiene una importancia notable, hayan promovido la aprobación de leyes que regulen el proceso de gestión de los mismos.

Ejemplo de ello es el Decreto 100/2018, de 20 de diciembre, de Valorización de Escorias en la Comunidad Autónoma de Cantabria. En este Decreto, se establecen los tipos de residuos y subproductos susceptibles de ser valorizados, los usos para los que están permitidos y las condiciones que deben reunir para ello. Otros ejemplos pueden ser el Decreto 34/2003, de 18 de febrero, por el que se regula la valorización y posterior utilización de escorias procedentes de la fabricación de acero en hornos de arco eléctrico, en el ámbito de la Comunidad Autónoma del País Vasco o el Decreto 32/2009, de 24 de febrero, sobre la valorización de escorias siderúrgicas de la *Generalitat de Catalunya*.

Desde el punto de vista de las mezclas bituminosas, la utilización de subproductos siderúrgicos como árido se incluye en estos Decretos como uno de los usos permitidos. Si bien es cierto que este uso se limita a unos tipos de residuos determinados, la existencia de un Decreto donde se establecen una serie de requisitos, objetivos y medibles, que garantizan que un determinado subproducto sea apto para su uso en mezclas bituminosas, marca el punto de partida para el estudio de cualquier otro subproducto de similar naturaleza, aunque no esté recogido explícitamente por esa legislación.

También, otro punto fundamental de estos Decretos es que todos ellos recogen como parte principal la protección del medioambiente y la salud de las personas. Por tanto, con el cumplimiento de esta legislación no solo se consigue declarar a un subproducto como valorizable desde un punto de vista técnico, sino que también se garantiza que la utilización de dicho material no supone ningún problema ni para el medioambiente ni para la salud de las personas.

A partir de estas premisas, a continuación se recogen los aspectos más destacados de cada uno de los subproductos considerados, repasando sus propiedades físicas y químicas, así como diferentes estudios que han sido desarrollados durante los últimos años al respecto de su utilización en mezclas bituminosas.

#### *2.2.1.1. Escoria negra de horno de arco eléctrico*

El horno de arco eléctrico es hoy en día la principal alternativa para la producción de aceros al carbono. Durante el proceso de producción se generan distintos residuos, destacando en este apartado a la escoria negra o escoria EAF. Esta escoria cumple la función de protección del acero líquido y del revestimiento refractario del horno durante la fase de fundición. Durante esta fase, la escoria va variando en sus características de forma que una vez extraída del horno, la escoria presenta colores muy oscuros, con aspecto poroso, morfología regular, cúbica y fractura puntiaguda.

Una vez es extraída del horno en estado incandescente, la escoria negra es sometida a un proceso de transformación, el cual tiene una influencia muy importante en las características finales del material. Por tanto, este proceso deberá realizarse con el objetivo de que el producto final alcance la mayor calidad posible en función del uso al que vaya a ser destinado. Para su posterior valorización como árido, el proceso de transformación recomendado comienza con el proceso de refrigeración de la escoria, el cual suele dividirse en dos etapas.

En una primera etapa, la escoria es enfriada mediante un sistema de aspersión con agua, durante aproximadamente media hora para posteriormente en una segunda etapa, con la utilización de medios mecánicos convencionales (ej. retroexcavadora), sumergirla en agua y continuar con el enfriamiento durante al menos otras dos horas. Durante este proceso se produce la fracturación de las escorias, formando partículas de tamaños variables, generalmente inferiores a 400 mm. Una vez enfriada, mediante un sistema de cribado se clasifica, aprovechando durante esta fase para eliminar las partes metálicas residuales de mayor tamaño mediante la acción de un electroimán.

Finalmente, con el objetivo conseguir los tamaños de partícula adecuados se procede al machaqueo y clasificación por tamaños de la misma, de forma que se consiga la granulometría requerida para su posterior aplicación (mezcla bituminosa, rellenos, hormigón, etc.). Una vez obtenida la granulometría deseada, la presencia de componentes que aún permanecen en estado activo, y que pueden provocar inestabilidad volumétrica hace necesario someter a la escoria a un proceso de estabilización.

En este sentido, un estudio elaborado por Frías *et al.* (2010) evidencia que someter a la escoria a un proceso de envejecimiento determinado produce una reducción en la capacidad de expansión del material así como la total desaparición de la cal libre [17]. Este proceso consiste básicamente en extender la escoria sobre una superficie amplia y someterla a ciclos de humectación-secado. Se ha demostrado que este tratamiento es principalmente efectivo durante los primeros 45 días, considerándose estabilizada la escoria a partir de ese momento [18].

Una vez la escoria ha sido estabilizada, es necesario valorar su aptitud para el uso que se pretenda. En este sentido, debido al interés derivado de su reciente publicación, a continuación se detallan los requisitos recogidos en el Decreto 100/2018, de 20 de diciembre, de Valorización de Escorias en la Comunidad Autónoma de Cantabria, el cual define como escoria valorizable a aquella escoria que se considera como una materia apta ambientalmente para los usos admisibles recogidos en el propio Decreto, sin perjuicio del cumplimiento del resto de requisitos técnicos que pudieran resultar de aplicación, tanto los incluidos en el propio Decreto como en cualquier otra norma técnica aplicable.

Por tanto, previamente a comprobar el cumplimiento de los requisitos técnicos exigibles para el uso de escoria en la fabricación de mezclas bituminosas, es necesario comprobar el cumplimiento de los requisitos necesarios para conseguir ese estatus de escoria valorizable. En este caso, se entiende que una escoria es valorizable cuando el resultado de los análisis realizados sobre el lixiviado (obtenido según la norma EN 12457-4) indica que no se sobrepasan los valores máximos permitidos para los parámetros indicados en la Tabla 2-1.

Sin embargo, la propia legislación contempla la singularidad de que estos umbrales podrán no ser de aplicación cuando los usos previstos de la escoria valorizada sean la fabricación de hormigón o cemento u otros usos que tengan como finalidad la incorporación de la escoria como materia prima de algún producto. En este sentido, considerando la mezcla bituminosa como un producto, estos umbrales podrían no ser un requisito de obligado cumplimiento, siendo quizás más conveniente evaluar el lixiviado de la mezcla bituminosa en su conjunto.

Tabla 2-1. Análisis sobre el lixiviado de la escoria. Valores máximos permitidos (mg/kg de materia seca)

Parámetro	Valor máximo	Parámetro	Valor máximo
Bario	20	Molibdeno	0,5
Arsénico	0,5	Selenio	0,1
Cadmio	0,04	Antimonio	0,06
Cobre	2	Cloruro	800
Cromo total	0,5	Fluoruro	10
Mercurio	0,01	Sulfato	1.000
Níquel	0,4	Índice de fenol	1
Plomo	0,5	COD	500
Zinc	4	STD	4000

Una vez conseguido ese estatus de escoria valorizable, esta deberá cumplir con una serie de condiciones para poder ser utilizada como árido en la fabricación de mezclas bituminosas. En el caso particular de la escoria negra, el Decreto 100/2018 contempla como un uso admisible la utilización de la misma en la fabricación de mezclas bituminosas y a partir de ahí establece una serie de requisitos que debe cumplir. En concreto, para el uso en carreteras pertenecientes a la Red autonómica de Cantabria esta legislación establece los siguientes requisitos:

- Tanto la utilización de escorias como árido, como el uso de combinación de escorias con áridos naturales o artificiales para la fabricación de mezclas bituminosas queda sujeta al cumplimiento de las prescripciones establecidas para los áridos en los artículos 542 y 543 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes, PG-3.
- La escoria deberá presentar una expansividad inferior al 3,5% según la norma EN 1744-1, siendo la duración del ensayo de 168 horas.
- El resultado del Índice Granulométrico de Envejecimiento IGE (NLT-361) será inferior al 1%.
- El contenido de cal libre deberá ser inferior al 0,5% determinado según la norma EN 1744-1.
- El contenido ponderal de sulfatos solubles en agua, determinado según la norma EN 1744-1, será inferior al 0,2% donde los materiales estén en contacto con capas tratadas de cemento e inferior al 0,7% en los demás casos.

El cumplimiento de estos requisitos da paso inexcusablemente a verificar que la escoria cumple con las prescripciones marcadas para los áridos en los artículos 542 y 543 del PG-3. A la hora de establecer los distintos requisitos, los cuales se detallan más adelante, el PG-3 diferencia entre árido grueso y árido fino en función de si su tamaño máximo de partícula es superior o inferior a 2 mm respectivamente. Por ejemplo, para un árido grueso las limitaciones están relacionadas con la limpieza, la angulosidad, la forma, la resistencia a la fragmentación o la resistencia al pulimento, mientras que para un árido fino las limitaciones se centran básicamente en la limpieza y procedencia del árido.

#### Composición química y propiedades físicas de la escoria negra.

Una de las principales características de las escorias es que sus propiedades pueden variar dependiendo del contexto particular en que sean producidas. En general, los principales componentes químicos de la escoria negra son óxidos de hierro (FeO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), cal (CaO), óxido de silicio (SiO<sub>2</sub>), magnesia (MgO) y alúmina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). En la Tabla 2-2 se muestra el rango de valores más habitual para cada uno de los componentes que forman la escoria. Esta recopilación, elaborada por Skaf *et al.* en 2017 [19], engloba los resultados de varios proyectos de investigación llevados a cabo en España [18,20-23].

Tabla 2-2. Composición química de la escoria negra de horno de arco eléctrico.

Componente	Cantidad (% en peso)	Componente	Cantidad (% en peso)
CaO	25 - 35	CaO <sub>libre</sub>	0 - 4
SiO <sub>2</sub>	10 - 20	FeO	7 - 25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3 - 10	MnO	< 6
MgO	2 - 9	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	< 6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10 - 30	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	< 2

En lo que a propiedades físicas se refiere, destaca en primer lugar la mayor densidad que tiene la escoria negra en comparación con un árido convencional, tomando valores que van desde los 3,2 hasta los 3,8 g/cm<sup>3</sup>. Esta característica es uno de los aspectos con mayor importancia a la hora de determinar el coste, tanto económico como ambiental, del uso de la escoria, ya que tiene un impacto muy importante en el transporte y manejo tanto de la propia escoria como de la correspondiente mezcla bituminosa resultante.

Otras de las propiedades físicas más características de la escoria negra son [19]:

- Baja presencia de finos, resultando en valores altos de equivalente de arena.
- El árido grueso suele presentar una forma adecuada, con una angulosidad elevada y textura rugosa, presentando por lo general un índice de lajas bajo.

- Valores de porosidad y absorción de agua mayores que un árido convencional.
- Elevada resistencia al desgaste. Suele presentar valores bajos en el coeficiente de Los Ángeles pero estos pueden variar dependiendo especialmente de los procesos de enfriado y machaqueo. Referencias tomadas de diversos estudios muestran valores desde 13 hasta 25 para este coeficiente [21,24].
- Buena microtextura y buena resistencia a al pulimento, con valores del coeficiente de pulimento acelerado (CPA) superiores a 50.
- Buena adhesividad con el betún.
- Mayor conductividad eléctrica y mayor capacidad de almacenamiento de calor que un árido convencional.

#### Uso de la escoria negra en mezclas bituminosas.

Existen en la actualidad múltiples estudios relacionados con el uso de escoria negra en mezcla bituminosa. En la gran mayoría de estos estudios la escoria negra se utiliza en sustitución del árido grueso de la mezcla, a consecuencia de las buenas características físicas que presenta este material para este uso en particular: rugosidad, angulosidad, dureza y resistencia al pulimento. Por supuesto, existen también estudios que analizan su rendimiento como sustituto del árido fino [25-32] e incluso como sustitutivo del filler [33,34].

Algunas de las principales conclusiones extraídas de los diferentes estudios en relación con el uso de la escoria negra en mezclas bituminosas son las siguientes:

- Bagampadde *et al.* (1999) establecen que el mejor comportamiento se ha observado en mezclas compuestas por escoria negra en la fracción de árido grueso y árido calizo en las fracciones de árido fino y filler, definiendo el comportamiento de mezclas con la fracción mineral compuesta exclusivamente por escoria como inapropiado. Se hace especial mención a las mezclas que incorporan la escoria en la fracción de filler, resaltando que estas presentan una mayor susceptibilidad al daño por la acción del agua y un intolerable comportamiento a fatiga [33].
- Ziari y Khabiri (2007) establecen que la calidad de las mezclas que incorporan escoria negra en la fracción de árido fino decrece sustancialmente a medida que se aumenta la tasa de sustitución, recomendando no superar una tasa de sustitución superior al 50% en dicha fracción del árido [26].

- Asi *et al.* (2007) concluyen que una sustitución del 75% del árido grueso por escoria negra resulta en un mejor comportamiento de la mezcla. Sin embargo, el mejor comportamiento se alcanza con una sustitución en torno al 25% en dicha fracción del árido [35].
- Hesami *et al.* (2015) concluyen que la incorporación de la escoria negra en la fracción fina del árido resulta en mezclas con peor comportamiento ante el efecto del agua en comparación con mezclas compuestas por árido calizo en dicha fracción. Además establecen que la composición óptima en términos de susceptibilidad al efecto del agua es la compuesta por escoria negra y árido calizo en la fracción gruesa y fina del árido, respectivamente [29].
- Passetto y Baldo en múltiples estudios defienden que mezclas bituminosas con altos porcentajes de sustitución tanto del árido grueso como del fino por escoria negra presentan mejor comportamiento mecánico, mejor comportamiento a fatiga y una mayor durabilidad que las mezclas convencionales [36–41].
- Fonseca *et al.* (2013) recogen en su estudio que el uso de escoria negra como árido fino, y especialmente como filler requiere de un proceso de machaqueo, el cual es especialmente caro debido al gran desgaste que sufren las muelas a causa de la elevada dureza de la escoria y la presencia de partículas metálicas [21].
- Ameri *et al.* (2013) establecen que la mayor absorción de la escoria negra, en comparación con un árido convencional, hace que la mezcla requiera un mayor contenido de ligante, siendo especialmente importante cuando la escoria es utilizada en la fracción fina del árido donde, debido a la mayor superficie específica de las partículas, el efecto de la absorción es mayor [32].

Por lo tanto, a la vista de las propiedades físicas de la escoria negra y teniendo en cuenta las diferentes conclusiones extraídas de estos estudios, sin entrar a valorar las particularidades de cada caso, la escoria negra parece posicionarse como una buena alternativa para la fracción gruesa del árido, no quedando tan clara la viabilidad de su uso en las fracciones más finas.

Por otro lado, un aspecto básico en el diseño de mezclas que combinan escoria negra con áridos convencionales es que el ajuste granulométrico debe ser realizado en volumen de árido en lugar de peso. De esta forma, se consigue corregir la desviación provocada por las diferencias en las densidades. Otro aspecto a tener en cuenta en la fase de diseño es que, debido a la gran angulosidad de sus partículas, la mezcla puede resultar en un contenido de huecos mayor al esperado, incluso cuando la escoria es utilizada solo en la fracción fina del árido [25,26,33].

Por último, durante la fase de producción y puesta en obra de este tipo de mezclas es necesario considerar una serie de particularidades, entre las cuales se encuentran las siguientes [33,42,43]:

- Incremento en el coste de transporte a causa de la mayor densidad de la mezcla.
- Puede ser necesario un mayor tiempo de calentamiento para asegurar la total evaporación de la humedad de los áridos (mayor porosidad de la escoria).
- Mayor tiempo de enfriamiento debido a la mayor inercia térmica de la escoria, que puede afectar a la apertura al tráfico tras la puesta en obra de la mezcla.
- Problemas en la compactación de mezclas con tasas muy elevadas de escoria, a causa de la mayor angulosidad de la escoria.

#### Comportamiento mecánico de las mezclas bituminosas con escoria negra.

Durante la última década se han ido desarrollando diversos estudios donde se sustituyen los áridos naturales por escoria negra. En base a las principales conclusiones de estos estudios, de una forma general es posible establecer que las mezclas que incorporan escoria negra en su composición no presentan una disminución significativa en su rendimiento, incluso, en determinados casos ese rendimiento se ve mejorado por la presencia de esta. Algunas de las principales conclusiones se muestran a continuación:

- Muchos estudios coinciden en que la presencia de la escoria supone un aumento de los valores de estabilidad y una reducción en la deformación en el ensayo Marshall, lo que parece indicar, y en lo que también coinciden diversos autores, un incremento de la rigidez de la mezcla. Algunos autores atribuyen este incremento a la mayor rugosidad y angulosidad de la escoria, al mayor contenido de betún de estas mezclas o a la buena adhesión que existe entre la escoria y el ligante. En algunos casos se indica que el impacto sobre estas propiedades es mayor cuando se reemplaza por escoria la fracción gruesa del árido [25,28,36-41,44-49].
- En términos de resistencia a la deformación permanente, las mezclas con escoria, en general, presentan un muy buen comportamiento. Esto se atribuye principalmente a las buenas propiedades que tiene la escoria para desempeñar la función de árido grueso [30,32,36,38,49-51]. De hecho, algunos autores apuntan que se obtiene un mayor rendimiento cuando solo se reemplaza por escoria la fracción gruesa del árido [26,32,33].

En cuanto a la tasa de sustitución óptima no hay un consenso claro, y dependerá de cada situación particular y de los objetivos que se persigan. En cualquier caso, incorporar la escoria en la fracción de árido fino no parece aportar una mejoría tan significativa en comparación con un árido convencional (ej. caliza), como para compensar su reemplazo, especialmente si se tiene en cuenta el incremento en el contenido de ligante asociado a la mayor absorción de este material.

- En lo que respecta a la susceptibilidad al agua de las mezclas que incorporan escoria negra, esta parece depender en gran medida de las condiciones particulares de cada caso. En general, varios autores coinciden en sus estudios en que el uso de escoria tiene un efecto positivo tanto si se usa como árido grueso como si se usa como fino, resultando en valores más altos de resistencia a tracción indirecta y de resistencia conservada [30,36,38,39,41,49].

En cualquier caso, esta mejoría no tiene tanto que ver con las características de la escoria sino que algunos de estos autores coinciden en el análisis de que, pese a tener una menor afinidad con el betún en comparación, por ejemplo, con un árido calizo, la mayor porosidad y rugosidad de la escoria unida al mayor contenido de ligante de este tipo de mezclas permite obtener un mejor recubrimiento de los áridos, y por tanto, evitar en mayor medida el daño causado por el agua [29,32].

Sin embargo, también existen otros estudios donde los resultados obtenidos en el ensayo de sensibilidad al agua no consiguen alcanzar valores aceptables [48,52]. Un ejemplo es el estudio elaborado por Fang *et al.* (2013), donde se estudian diferentes características de mezclas porosas que utilizan escoria negra en su composición. En este estudio se puede ver cómo el resultado del ensayo de sensibilidad al agua resulta en valores muy bajos de resistencia conservada cuando se utiliza un betún convencional, y que ese resultado no mejora lo suficiente cuando se utiliza un betún modificado con polímeros, manteniéndose la resistencia conservada en niveles del 65-70% [52].

- Relativo al comportamiento a fatiga también existe cierta variabilidad en los resultados. Por ejemplo, hace un par de décadas, Bagampadde *et al.* (1999) presentaron unos resultados donde el uso de escoria se traducía en mezclas con peor comportamiento a fatiga, y este peor comportamiento se acentuaba cuando el porcentaje de sustitución de los áridos se incrementaba hasta el 100% [33].

Estudios posteriores han mostrado que es posible obtener buenos resultados en el ensayo de fatiga [31,35,39,41,45,53]. En particular, uno de los estudios más recientes elaborado por Ziari *et al.* (2015) muestra que, en general, el uso de escoria en cualquiera de los tamaños del árido favorece el rendimiento a fatiga, pero que la cantidad total de sustitución está limitada dependiendo de las condiciones particulares de cada caso. En particular, este estudio muestra que una sustitución del 100% de los áridos resulta en un comportamiento a fatiga inaceptable [25].

- Por último, es necesario destacar la excelente resistencia al deslizamiento que presentan las mezclas con escoria, consistente con el muy buen resultado que presenta este material en términos de resistencia al pulimento. Esta característica hace a este tipo de mezclas especialmente interesantes para ser utilizadas en capas de rodadura y bajo las condiciones más exigentes de tráfico [35,54-56].

#### Consideraciones medioambientales asociadas a las mezclas bituminosas con escoria negra.

Uno de los mayores problemas que ha frenado la utilización de escorias en carreteras han sido los problemas de expansividad. La inestabilidad volumétrica de la escoria provocó que durante los primeros años de su aplicación en carreteras surgieran problemas de expansividad, especialmente cuando la escoria se utilizaba en rellenos. Hoy en día se sabe que esos problemas venían asociados a la ausencia de un tratamiento adecuado de la escoria y al uso conjunto de escoria negra y escoria blanca, esta última con mayor potencial de expansividad.

Actualmente existe cierto consenso para asegurar que, con el adecuado tratamiento, la escoria negra no genera ningún problema de expansividad en la mezcla bituminosa. Además, en la legislación antes descrita, la expansividad de la escoria ya está recogida como uno de los requisitos a cumplir, y por tanto, cumplirlo ya supone cierta garantía de que no habrá ningún problema en la mezcla resultante.

Existen ejemplos que avalan la inexistencia del problema de expansividad en diferentes experiencias de tramos reales donde se han colocado mezclas bituminosas con escoria. Un buen ejemplo está en el País Vasco [21], donde las escorias fueron utilizadas para la fabricación de mezcla bituminosa en la construcción de una autovía. Los resultados, tras 5 años de monitorización, no mostraron ningún problema de expansividad. En este caso, la escoria había sido previamente sometida al tratamiento de estabilización, habiendo resultado en un valor para el ensayo de expansividad inferior al 5% y en un contenido de cal libre inferior al 0,5%.

Otro aspecto muy importante está relacionado con las características del lixiviado asociadas al uso de este tipo de escoria. En general, diferentes estudios coinciden en que la incorporación a la mezcla provoca que los valores obtenidos para la escoria de forma individual disminuyan en gran medida, quedando estos muy por debajo de los requerimientos legales. En general, los componentes más críticos son el cromo y el vanadio, pero en cualquier caso, los resultados muestran valores muy bajos que no representan ningún riesgo para la salud humana [57,58].

Por último, el mayor peso específico de esta escoria en comparación con los áridos convencionales provoca que existan ciertos inconvenientes, principalmente asociados con el transporte. Tanto en el transporte del propio material como en el de la mezcla bituminosa resultante la mayor densidad hace necesario incrementar los medios de transporte necesarios para transportar un mismo volumen de material, con la afección que esto tiene tanto en términos económicos como en términos de contaminación.

#### 2.2.1.2. Escoria LD

La escoria de horno de oxígeno o escoria LD tiene su origen en el alto horno, concretamente durante el proceso de afinado del arrabio. Dentro del procedimiento Linz-Donawitz para la producción de acero (de donde surge su denominación como escoria LD), la fundición de hierro procedente del alto horno se somete a un proceso de afino por medio de la inyección de oxígeno a presión en el baño, el cual contiene las diferentes adiciones que originan la formación de la escoria (fundamentalmente cal, dolomía y espató). La misión fundamental de la escoria es atrapar las impurezas (principalmente fósforo y azufre). La escoria se genera formando una capa sobre la superficie del acero, la cual es posible separar por gravedad y enviarla a un foso donde se riega hasta reducir su temperatura por debajo de los 50°C.

Una vez se ha enfriado, se procede con el procesado de la escoria. En primer lugar, las partículas metálicas superiores a 80 mm se separan mediante electroimanes dejando el resto del material que pase hacia la instalación de machaqueo. En dicha instalación se reduce a tamaños de partícula inferiores a 50 mm para posteriormente eliminar las partículas metálicas mediante electroimanes. Finalmente, la escoria se clasifica por tamaños y se procede, en su caso, al proceso de envejecimiento que al igual que con la escoria negra, se realiza mediante riego con agua para conseguir hidratar los elementos inestables. En España, el periodo de estabilización habitual oscila entre 3 y 6 meses [66].

La valorización de este tipo de escoria no está tan regulada como en el caso de la escoria negra, pero también existen en España experiencias y documentación técnica que avala su uso. En este caso, el Decreto 100/2018 mencionado anteriormente no recoge este material dentro de su ámbito de aplicación, ya que este decreto solamente se centra en las escorias procedentes de los procesos térmicos empleados en el ámbito de la Comunidad Autónoma de Cantabria. En cualquier caso, los valores exigidos en él también pueden servir de referencia para este tipo de escorias. Por tanto, a la hora de valorar la viabilidad tanto medioambiental como técnica de este tipo de escorias es aconsejable utilizar las mismas prescripciones mostradas para la escoria negra en el apartado anterior.

#### Composición química y propiedades físicas de la escoria LD.

La escoria LD se caracteriza por tener una proporción importante de óxidos de hierro y de cal, con una parte de ella en forma libre. En concreto, el contenido de CaO se sitúa en torno al 45-50%, siendo esta la característica que más influencia puede tener en su posterior aplicación en la construcción de carreteras, ya que puede suponer problemas de expansividad. Otra característica de estas escorias es que presentan un pH alcalino, con valores superiores a 11 o 12. En la Tabla 2-3 se muestra la composición química media de la escoria LD. Esta composición es resultado de un estudio elaborado en 1990 donde se tomaron muestras en multitud de coladas, concluyendo que la variación entre coladas no resultó ser muy importante [66].

Tabla 2-3. Composición química de la escoria LD.

Componente	Cantidad (% en peso)	Componente	Cantidad (% en peso)
CaO	48	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,5
SiO <sub>2</sub>	16	Cu	0,03
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,2	Mo	0,08
MgO	5,2	As	< 1 ppm
Fe <sub>Total</sub>	16,04	Cd	< 0,5 ppm
MnO	5,9	B	0,17

En cuanto a las propiedades físicas, la escoria LD es un material de color gris claro, poroso y de textura rugosa, con una absorción de agua generalmente inferior al 3%. Las propiedades físicas más destacadas desde el punto de vista de su utilización en mezclas bituminosas son las siguientes [66]:

- Densidad relativamente alta, con valores en torno a los 3 g/cm<sup>3</sup>.
- Las partículas tienen forma cúbica, angulosas (> 95% caras de fractura) y con baja presencia de lascas.

- Buena resistencia al pulimento aunque puede variar mucho dependiendo del origen.
- Buena resistencia al desgaste, con valores del coeficiente de Los Ángeles generalmente inferiores a 20.

#### Uso de la escoria LD en mezclas bituminosas.

Del uso de escoria LD en mezclas bituminosas no hay tanta información como en el caso de la escoria negra. Este material, a priori presenta buenas características para ser utilizado en mezclas bituminosas, incluso en capas de rodadura gracias a su buena resistencia al deslizamiento. Algunas de las conclusiones más interesantes relativas al uso de este material son las siguientes:

- De acuerdo con Xue *et al.* (2006), debido a la mayor absorción de la escoria en comparación con un árido natural, lo cual genera una mayor demanda de betún, su utilización es más recomendable en la fracción gruesa del árido, donde este efecto tiene menor influencia [59].
- Shen *et al.* (2009) muestran que la sustitución de los áridos, en distintos porcentajes, por escoria LD es una solución técnicamente viable en mezclas porosas. De hecho, para las condiciones particulares de su estudio concluyen que en base a los resultados obtenidos en los ensayos realizados, la tasa óptima de sustitución es del 100% de los áridos [60].
- Xie *et al.* (2013) emplean la escoria LD solamente en la fracción gruesa del árido, completando la fracción fina con árido calizo, sin dar ninguna explicación sobre el porqué de esta decisión [61].
- López-Díaz *et al.* (2018) muestran en su estudio los resultados de una mezcla diseñada con el 100% de los áridos compuestos por escoria LD, concluyendo que es una solución técnicamente viable [62].

En relación con el diseño de mezclas bituminosas con escoria LD, al igual que lo comentado para la escoria negra, es necesario tener en cuenta la diferencia de peso específico que existe con los áridos convencionales a la hora de ajustar la granulometría de la mezcla. En relación con el transporte, al igual que ocurre con la escoria negra, la mayor densidad de la mezcla resultante hace que el coste y la contaminación asociada al mismo se incrementen. También en este caso, estas mezclas tienen la capacidad de retener más el calor lo que, por un lado, permite transportes más largos pero por otro, puede suponer un retardo para la puesta en servicio.

### Comportamiento mecánico de las mezclas bituminosas con escoria LD.

Algunos de los aspectos más destacados encontrados en la bibliografía en relación con el comportamiento mecánico de mezclas bituminosas con escoria LD se resumen a continuación.

- Wu *et al.* (2007) indican que, debido a que la escoria LD es un material poroso e hidrofóbico, esta tiene buena capacidad de absorción del betún, lo que se traduce en una mejoría en el comportamiento ante deformación permanente a altas temperaturas [63].
- Así mismo, Xue *et al.* (2006) muestran que el uso de escoria LD produce mezclas con mejor comportamiento ante deformación permanente y una menor susceptibilidad al daño por agua [59].
- Shen *et al.* (2009) utilizaron esta escoria en la fabricación de mezclas porosas, y encontraron que su uso puede mejorar la resistencia al deslizamiento, la susceptibilidad al agua, la resistencia a la deformación permanente y reducir el ruido [60].
- Diferentes estudios sobre el uso de esta escoria en mezclas de tipo SMA (*Stone Mastic Asphalt*) muestran un mejor comportamiento en términos de deformación permanente, estabilidad a altas temperaturas, adhesividad y rotura frágil a bajas temperaturas [63,66].
- Huang *et al.* (2017) establecen que la estabilidad Marshall tiende a incrementar a medida que se incrementa el contenido de escoria LD [65].

Estas experiencias ponen de manifiesto que la escoria LD es un subproducto, a priori, técnicamente apto para ser utilizado en mezclas bituminosas. Al igual que la escoria negra, su uso se asocia con una mejoría en la resistencia a la deformación permanente y a un incremento en la estabilidad, indicativo de una mayor rigidez de la mezcla. Este incremento también puede ser atribuido a la mayor rugosidad y angulosidad de la escoria, al mayor contenido de betún de estas mezclas o a la buena adhesión que existe entre la escoria y el ligante.

### Consideraciones medioambientales asociadas a las mezclas bituminosas con escoria LD.

Al igual que la escoria negra, este material también puede presentar problemas de expansividad debido a la presencia de cal libre (CaO) y magnesia (MgO) en su composición, pudiendo ambos óxidos reaccionar con el agua y formar hidróxidos en una reacción expansiva. Para evitar este problema, lo habitual es someter a la escoria a un proceso de maduración o envejecimiento, de modo que antes de ser utilizada esta ya haya estabilizado su volumen. Como se ha comentado anteriormente, en España es habitual que este proceso tenga una duración de entre 3 y 6 meses.

Por otro lado, en relación con la contaminación del medioambiente, generalmente el lixiviado de las escorias LD no representa ningún problema; sin embargo, en algunos casos los lixiviados de Bario (Ba), Cromo (Cr), Vanadio (V) o Boro (B) podría alcanzar valores inadmisibles. También, en relación con el lixiviado, es necesario comentar que puede llegar a tener un pH superior a 11 y que se han dado casos de obstrucción de tuberías en los sistemas de drenaje a causa de la precipitación del carbonato cálcico procedente de la combinación de dicho lixiviado con el dióxido de carbono del aire. En cualquier caso, este lixiviado deberá ser objeto previo de análisis en cada caso y se deberá considerar que la escoria se dispondrá embebida en la mezcla bituminosa y que, por tanto, su lixiviado estará condicionado por esta situación [67].

Por último, del mismo modo que se comentaba para la escoria negra, el mayor peso específico de este material provoca que las operaciones de transporte se asocien a un mayor coste económico y a una mayor contaminación. En este sentido, para determinadas condiciones de puesta en obra, la viabilidad de utilizar este material puede verse comprometida por las operaciones de transporte.

#### 2.2.1.3. Arena de moldeo

El moldeo, también llamado fundición o colada, es un proceso de conformación sin arranque de viruta, basado en la fusión de los metales. Este método consiste en preparar un molde cuyo hueco toma la forma deseada (negativo) para posteriormente verter el metal en estado líquido y dejarlo enfriar adquiriendo dicha forma. La gran ventaja de este método está en que posibilita la obtención de piezas de formas muy complicadas, muy difíciles de obtener con otros métodos. También, este método permite el moldeo de metales que, por sus características, no permiten su conformado por mecanizado o soldadura (ej. fundición gris) [68].

En general, es posible encontrar moldes de arena, moldes de materiales refractarios (semipermanentes) y moldes metálicos o coquillas (permanentes). En el caso del moldeo con arena, los moldes tienen la particularidad de que no es posible su reutilización ya que, una vez ha solidificado el metal en su interior, el molde debe romperse para extraer la pieza. Esto no quiere decir que la arena no se vuelva a utilizar; de hecho, esta arena vuelve al inicio del ciclo de producción y es reutilizada en la fabricación de sucesivos moldes. Sin embargo, después de varios ciclos, la arena pierde progresivamente algunas de sus propiedades, dejando de ser apta para este uso y debiendo ser retirada del proceso de producción [69].

Dentro de lo que se considera moldeo con arena, existen distintos métodos que se pueden clasificar según el producto que se utiliza a modo de ligante en la fabricación de las piezas. De esta forma, se distingue entre dos técnicas fundamentalmente: moldeo en arena verde y moldeo en arena química. En el caso del moldeo en arena verde, el molde se obtiene por la mezcla de arena de sílice (85-95%), bentonita a modo de aglutinante (4-10%), aditivos carbonosos para mejorar el acabado superficial y agua (2-5%). Por su parte, en el moldeo en arena química, el molde está compuesto básicamente por arena de sílice (93-99%) y un ligante de origen químico (1-3%) [70].

#### Propiedades químicas y físicas de arena de moldeo.

La arena de moldeo, compuesta básicamente por arena de sílice, presentará las propiedades físicas propias de la arena que se utiliza para su fabricación. De forma general, estas arenas son de forma redondeada y con un tamaño de partícula uniforme. El 85-95% de las partículas suelen tener un tamaño entre 0,6 y 0,15 mm, pudiendo el restante 5-12% presentar tamaños inferiores a 0,075 mm. El color suele tomar tonos oscuros cuando se trata de moldeo en arena verde y tonos más claros en el caso de moldeo químico. La densidad variará en función de la arena utilizada pero, en general, toma valores entre 2,4 y 2,8 g/cm<sup>3</sup> [71].

La composición química de este material va a depender fundamentalmente del tipo de ligante y de los diferentes procesos de producción, con influencias, por ejemplo, del tipo de metal y de los combustibles utilizados en dichos procesos. El pH dependerá fundamentalmente del tipo de ligante utilizado, tomando valores habitualmente entre 4 y 8. Otro aspecto a tener en cuenta cuando se utiliza este material es la posible presencia de fenoles, y por tanto, el riesgo de que estos puedan llegar hasta las reservas de agua a través del lixiviado [71].

Algunos ejemplos de composiciones químicas en función del tipo de arena fueron publicados por Etxeberria *et al.* (2010), y se muestran en la siguiente tabla [72].

Tabla 2-4. Composición química de distintos tipos de arena de moldeo (% en peso)

Componente	Arena verde	Arena química	Componente	Arena verde	Arena química
SiO <sub>2</sub>	84,90	95,10	K <sub>2</sub> O	0,97	0,68
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,21	1,47	SO <sub>3</sub>	0,29	0,03
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,32	0,49	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,05	0,02
MnO	0,08	-	MgO	0,67	0,19
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,37	0,21	Na <sub>2</sub> O	0,50	0,26
TiO <sub>2</sub>	0,19	0,04	LOI	2,87	1,32
CaO	0,58	0,19			

### Uso de la arena de moldeo en mezclas bituminosas.

Pese a que su uso no está tan extendido como el uso de escorias, la incorporación de arena de moldeo en mezclas bituminosas ha sido evaluada en diversos estudios durante los últimos años. Algunas de las consideraciones más interesantes relativas al uso de este material en mezclas bituminosas son las siguientes:

- Los resultados experimentales del estudio elaborado por Bakis *et al.* (2006) indican que el uso de arena de moldeo como sustitutivo de los áridos utilizados en la fracción fina deberían limitarse a un porcentaje máximo de sustitución del 10% del peso total de áridos [73].
- Bradshaw *et al.* (2011) indican en su publicación que la arena de moldeo ha sido utilizada en mezclas bituminosas con resultados satisfactorios en distintas experiencias en Pennsylvania, Michigan y Tennessee (EEUU). En ese mismo estudio destacan que la gran variabilidad que existe entre las arenas de fundición hace necesario que, en cada caso, deban considerarse las características propias de esa arena en particular [74].
- Las mezclas bituminosas que incorporan arena de moldeo pueden ser diseñadas de igual modo que una mezcla convencional. El contenido de arena dependerá fundamentalmente de la cantidad de finos que incorpore a la mezcla dicha arena. Algunos estudios han mostrado que es posible sustituir entre 8 y el 25% de la fracción fina del árido por arena de moldeo [75].
- Según la publicación de *American Foundry Society* relativa al uso de arena de moldeo en mezclas asfálticas, este material se puede incorporar en tasas de hasta el 30%. Sin embargo, los requerimientos técnicos relativos a las mezclas para carreteras con grandes volúmenes de tráfico hacen que sea más común encontrar tasas de sustitución del 10 al 15%. El contenido de finos suele ser el factor que limita este porcentaje, siendo necesario ajustar en cada caso el diseño a las características de la arena de moldeo disponible [76].

A la vista de todas estas consideraciones es posible concluir que el uso de la arena de moldeo en las mezclas bituminosas no requiere modificaciones en el diseño ni en la fabricación de las mezclas bituminosas, pudiendo emplearse como si de una arena convencional se tratase. Sin embargo, el contenido de finos parece ser el principal factor que limita la cantidad a utilizar, aunque también se han reportado reducciones en el comportamiento de la mezcla cuando el porcentaje es superior al 10%. De todas formas, como ya se indicaba en uno de los puntos anteriores, la variabilidad de este material en función de su origen hace necesario que cada caso sea tratado de forma particular.

### Comportamiento mecánico de las mezclas bituminosas con arena de moldeo.

Respecto de la afección que tiene la incorporación de arena de moldeo en el comportamiento mecánico de las mezclas bituminosas, algunas de las conclusiones más destacadas encontradas en la bibliografía se muestran a continuación:

- Las mezclas bituminosas que contienen arena de moldeo en más de un 15% del peso total de la mezcla pueden presentar fallo por desmenuamiento de los áridos (*stripping*). La naturaleza hidrofílica de algunas arenas de moldeo favorece la ocurrencia de este tipo de fallo, provocando la pérdida de partículas finas y el consiguiente deterioro prematuro del pavimento. Este problema se puede mitigar limitando el contenido de arena a un máximo del 15% del peso total de la mezcla o mediante la utilización de aditivos específicos para evitar este fenómeno [77].
- Ensayos de laboratorio realizados en Wisconsin (EEUU) mostraron el potencial beneficio de utilizar arena de moldeo en mezclas bituminosas. Según este estudio, estas mezclas pueden presentar mayor estabilidad y mayor resistencia al efecto del agua que una mezcla que utiliza arena convencional. En algunos casos, estas mezclas también presentaron una mayor resistencia a la deformación permanente [74]. Por desgracia, no ha sido posible acceder a la fuente original para analizar las particularidades de este estudio.
- Según se indica en la página web de la *American Foundry Society*, el uso de arena verde puede provocar problemas por efecto del agua. En este sentido recomiendan que en cada caso se evalúe la susceptibilidad al agua de las mezclas, valorando en cada caso la posibilidad de incorporar o no algún aditivo para paliar el efecto negativo del agua [76].

### Consideraciones medioambientales asociadas a las mezclas bituminosas con arena de moldeo.

La arena de moldeo puede contener trazas de metales y restos parcialmente degradados de los materiales utilizados como ligante, lo cual podría provocar problemas en el lixiviado. En un estudio elaborado por Dungan *et al.* (2007) sobre 43 tipos de arena de moldeo procedentes de las industrias del aluminio y del acero, se concluye que la concentración de metales en estas arenas es similar a la encontrada en un suelo agrícola, respaldando por tanto que, de forma general, no van a existir problemas en este sentido [74,78].

En el caso particular de las mezclas bituminosas con arena de moldeo, el recubrimiento de este material por parte del betún hace que su afección al medioambiente sea aún menor. Varios estudios e investigaciones, incluido el elaborado por el Departamento de Energía de los Estados Unidos ponen de manifiesto que no existe ningún riesgo potencial para el medioambiente al incorporar arena de moldeo procedente de las industrias del acero y el aluminio en mezclas bituminosas [76]. Los problemas medioambientales asociados al uso de este material, por tanto, no van más allá de los considerados para una arena convencional.

### 2.2.2. Fresado.

Las mezclas bituminosas son el material más utilizado en todo el mundo para la construcción de las capas superficiales del firme de las carreteras. En España, prácticamente la totalidad de las carreteras utilizan este tipo de material. Es evidente por tanto que, dada la gran extensión de la red de carreteras, las mezclas bituminosas suponen un importante volumen de material dispuesto a lo largo de toda la red. A modo de referencia, en el año 2017 se produjeron en Europa (EU-28) un total de 233,9 millones de toneladas de mezcla bituminosa, de las cuales 15,2 millones se produjeron en España. En el año 2008, España alcanzó una producción de 42,3 millones de toneladas [10,79].

Las mezclas bituminosas tienen una vida útil que puede variar considerablemente dependiendo de los distintos factores que inciden sobre ella. Destacan como los factores más influyentes el tráfico (intensidad, carga por eje, velocidad, etc.) y las condiciones medioambientales (temperatura, radiación solar, heladas, etc.). Cuando el firme de la carretera alcanza un estado de deterioro tal que la carretera no alcanza a cumplir con los estándares mínimos exigidos es necesario sustituirlo. El material resultante de la demolición del firme existente es conocido comúnmente como fresado.

Cuando este material es reutilizado en la fabricación de mezcla bituminosa es habitual hablar de él como fresado, asfalto reciclado, mezcla bituminosa reciclada o, en inglés, *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP). En el año 2017 el 97% del asfalto reciclado disponible en España se reutilizó en la construcción o rehabilitación de carreteras, lo que supuso unas 494.000 toneladas. Concretamente, el 83% se reutilizó en la fabricación de nuevas mezclas bituminosas y el 14% restante se utilizó en capas granulares [10].

En otros países, la tasa de reciclado en mezclas bituminosas alcanza porcentajes superiores al 90%. Destacan países como Finlandia (100%), Eslovaquia (96%), Estados Unidos (96%), Bélgica (95%) o Hungría (95%). Al contrario, aún existen países donde esta tasa se sitúa en valores bajos, como es el caso de Turquía (9%), República Checa (14%), Eslovenia (24%) o Noruega (30%) [10].

A la vista de estos datos es evidente que este material tiene un gran potencial para ser reciclado, y de hecho, lo está siendo en la mayoría de los países. Según Chen *et al.* (2009), el fresado es hoy en día uno de los materiales más reciclados del mundo [80]. Sin embargo, no solo basta con conseguir una alta tasa de reciclado, sino que también es necesario extraer el máximo beneficio posible durante esta operación y esto en principio, se consigue reutilizándolo en la fabricación de mezclas bituminosas.

La utilización de fresado en la fabricación de nuevas mezclas bituminosas presenta una serie de beneficios que pueden ser agrupados en dos categorías, beneficios en términos de coste económico y beneficios medioambientales. Desde el punto de vista económico, el uso de fresado, por lo general, supone un ahorro de costes en la producción de la mezcla. Este ahorro tiene una fuerte dependencia de las condiciones particulares de cada caso, como pueden ser el precio de las materias primas, el contenido de fresado utilizado o las características de este. En el gráfico recogido en la Figura 2-2, Zaumanis *et al.* (2014) muestran la evolución del coste de fabricación, partiendo desde una mezcla convencional sobre la cual se va incrementando el porcentaje de fresado hasta llegar a una mezcla compuesta por fresado es su totalidad [81].

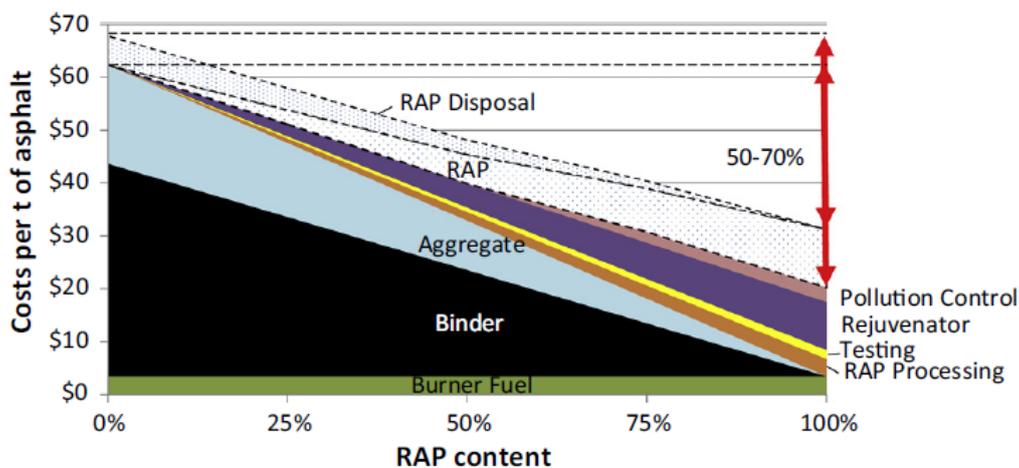


Figura 2-2. Coste de producción de mezcla bituminosa en función del contenido de fresado [81].

Por otro lado, desde el punto de vista medioambiental es posible destacar en primer lugar el evidente beneficio asociado a la reutilización de materiales, tanto por la reducción en la explotación de materias primas naturales como por la reducción de residuos generados. En este sentido, la aportación de materiales no se limita únicamente a una aportación de árido sino que en este caso también se produce una aportación de ligante, si bien es cierto que las propiedades de este último habrán variado considerablemente por efecto del envejecimiento.

El uso de fresado también aporta beneficios al medioambiente desde el punto de vista de reducción de las emisiones y el consumo de energía. En el caso específico de las mezclas bituminosas, los procesos que más energía demandan y mayores emisiones de gases de efecto invernadero generan son la producción del betún, la extracción de los áridos y la fabricación de la propia mezcla. En este sentido, el uso de fresado tiene una influencia positiva en estos impactos asociada a la menor necesidad de producción de materias primas [81-83].

Sin embargo, el uso de fresado también tiene asociados una serie de inconvenientes que deben ser tenidos en cuenta. Por un lado, este material presenta un estado de envejecimiento adquirido a lo largo de su vida útil en servicio que hace que las propiedades del mismo se hayan deteriorado, especialmente las del betún. Además, el grado de envejecimiento que presente la mezcla dependerá fundamentalmente de las condiciones en las que se ha desarrollado cada caso particular y de los motivos por los que dicha mezcla debe ser retirada. A esta heterogeneidad asociada al distinto grado de envejecimiento se une la heterogeneidad propia del material, que en cada caso estará compuesto por unos determinados materiales y en unas proporciones determinadas.

No es posible por tanto hablar de fresado entendido este como un material homogéneo, sino que se trata de un material con la gran particularidad de que en cada caso, dependiendo de su origen y su evolución, tendrá unas propiedades determinadas. En este sentido, es también importante destacar que el proceso de demolición del firme influye directamente sobre el producto final. Por ejemplo, la recuperación exclusiva de la capa de rodadura permite obtener un fresado cuyo árido, por ser apto para utilizarse en dicha capa del firme, presentará unas propiedades diferentes a los de un fresado obtenido de alguna de las capas inferiores. También, el procedimiento de demolición utilizado podrá influir en el producto final, pudiendo provocar la rotura de los áridos y por tanto variaciones en sus características y en su distribución granulométrica.

Debido a estos inconvenientes, la tasa de fresado que es posible utilizar en la fabricación de mezclas bituminosas se ve mermada. Esta limitación, a nivel técnico, dependerá en gran medida de las propiedades del fresado pero también de los requisitos exigidos a la nueva mezcla (tráfico, clima, capa de firme, etc.). De los inconvenientes mencionados merece ser destacado, debido a la gran influencia que ejerce sobre la capacidad de reutilización del fresado, el envejecimiento del betún.

El envejecimiento del betún, caracterizado por el endurecimiento del mismo, es un factor importante en el contexto del comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas. Éste está principalmente asociado con la pérdida de componentes volátiles y la oxidación del betún durante la construcción de la mezcla asfáltica y con la oxidación progresiva del material durante su vida de servicio. Ambos factores causan un incremento en la viscosidad del betún y la consecuente rigidez de la mezcla.

Destacan tres factores fundamentales, los cuales tienden a ser universalmente aceptados, que gobiernan los cambios que podrían causar el endurecimiento de los betunes [84]:

- Pérdida de volátiles: pérdida de los componentes oleosos del betún por volatilidad o por absorción por áridos porosos.
- Oxidación: cambios en la composición química de las moléculas de betún por la reacción con el oxígeno del aire.
- Efectos tixotrópicos (endurecimiento estérico o *steric hardening*): debidos a una reestructuración molecular de carácter física.

Estos factores pueden ser clasificados en dos grupos, juntando por un lado a los mecanismos de volatilización y oxidación como mecanismos de carácter químico y al endurecimiento estérico, asociado a un reajuste molecular en la estructura del betún, como mecanismo de carácter físico. Es necesario destacar que el endurecimiento de carácter físico es un proceso que puede revertirse mediante exposición a calor o mediante agitación mecánica, mientras que el endurecimiento químico es un proceso irreversible por estos medios, siendo necesario recurrir a la utilización de productos específicos, conocidos como activantes o agentes rejuvenecedores, para restaurar las propiedades perdidas, o al menos, mejorar las actuales [84].

Cuando el fresado se incorpora a una nueva mezcla, es necesario por tanto considerar no solo el aporte de áridos que se consigue sino también el aporte de betún envejecido. Mientras que los áridos no causan mayor inconveniente en su reutilización, siempre y cuando dichos áridos sean apropiados y su distribución granulométrica se ajuste a la mezcla en cuestión, el betún sí tiene una mayor influencia.

Por un lado, es posible que los áridos del fresado mantengan el recubrimiento de betún envejecido y que, por tanto, la envuelta con el nuevo betún y su distribución en la nueva mezcla, especialmente de los áridos finos, no sea adecuada, generando problemas de cohesión y el fallo prematuro de la mezcla. Por otro lado, existe la posibilidad de que el betún envejecido se mezcle, total o parcialmente, con el betún de aportación y que se alteren las propiedades de este último, resultando en un betún final en la mezcla que no reúna las características adecuadas para el fin propuesto.

#### Uso del fresado en la fabricación de mezclas bituminosas

Dado que a mayor tasa de fresado reutilizado, mayor importancia adquieren estos inconvenientes, es habitual que la legislación establezca límites en la tasa máxima de fresado a utilizar, y así evitar este tipo de situaciones y garantizar una integración adecuada del fresado dentro de la nueva mezcla, sin que el rendimiento de esta se vea comprometido.

Algunos de estos ejemplos donde se limita la cantidad máxima de fresado los se encuentran en la legislación de Suecia (30%), Reino Unido (50%), Francia (40%) o Bélgica (50%). Estos porcentajes se ven generalmente limitados cuando se trata de mezclas bituminosas para capa de rodadura (10-20%). Sin embargo, también existen países donde no se establece ningún tipo de límite. Este el caso de Alemania y Austria.

En España, el PG-3 establece que en la fabricación de mezclas bituminosas para capas de base e intermedias (no permite su uso en capas de rodadura) podrá emplearse el material procedente del fresado de mezclas bituminosas en caliente, según las proporciones y criterios que se indican a continuación:

- En proporción inferior o igual al 15% de la masa total de la mezcla, empleando centrales de fabricación que cumplan las especificaciones del epígrafe 542.4.2 y siguiendo lo establecido en el epígrafe 542.5.4 del PG-3.
- En proporciones superiores al 15%, y hasta el 60%, de la masa total de la mezcla, siguiendo las especificaciones establecidas al respecto en el artículo 22 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Conservación de Carreteras, PG-4 (detallado más adelante).
- En proporciones superiores al 60% de la masa total de la mezcla, será preceptiva la autorización expresa de la Dirección General de Carreteras. Además se realizará un estudio específico en el Proyecto de la central de fabricación de mezcla discontinua y de sus instalaciones especiales, con un estudio técnico del material bituminoso a reciclar por capas y características de los materiales, que estarán establecidas en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares.

De forma resumida, destacar que no es posible utilizar fresado en mezclas para capa de rodadura, permitiéndose solo su uso en capas intermedias y de base. En el caso de utilizarse con una tasa inferior al 15%, el procedimiento a seguir es el mismo que si de una mezcla convencional se tratase, con alguna salvedad relacionada con el tipo de central de fabricación. En concreto, la central deberá disponer de, al menos, dos tolvas adicionales para el fresado y será capaz de incorporarlo sin afectar negativamente al resto de materiales, y en especial, al ligante de aportación.

En el caso de mezclas con contenidos entre el 15 y el 60% es necesario remitirse al artículo 22 del PG-4. A continuación se recogen de forma resumida algunos de los requisitos más destacados de dicho artículo:

- El ligante de aportación será seleccionado en función de la proporción y las características del ligante procedente del fresado, de forma que al combinarse con éste se obtenga un ligante de características que cumplan con lo indicado en el artículo 542 del PG-3. El tipo y proporción del ligante de aportación necesario se definirá en función de la penetración del ligante final.
- El fresado no podrá contener más del 20% de mezclas bituminosas distintas de los tipos densas (D), semidensas (S) o gruesas (G) definidos en el artículo 542 del PG-3 (equivalentes a las actuales AC).
- En principio, todos los materiales recuperados de mezclas bituminosas son susceptibles de ser reciclados, excepto los que hayan presentado problemas de deformación permanente.
- Deberá realizarse un estudio especial cuando el fresado contenga los siguientes materiales: riegos con gravilla, lechadas bituminosas, mezclas bituminosas drenantes o mezclas bituminosas discontinuas en caliente.
- El fresado en bruto se someterá en la central a un tratamiento previo de trituración, eliminación de contaminantes y homogeneización. Una vez disgregado, deberá pasar en todo caso por el tamiz 25 mm de la EN 933-2.
- Los áridos procedentes del fresado no deberán presentar signos de meteorización y deberán poseer unas propiedades de dureza y calidad similares a las exigidas a los áridos nuevos de aportación.
- La dotación total de ligante (el de aportación más el procedente del fresado) no será inferior, expresada en proporción en masa sobre el total de los áridos en seco de la mezcla, al 4% en capas intermedias y al 3,5% en capas de base.
- La dotación de ligante de aportación deberá ser como mínimo el 60% de la dotación total de ligante de la mezcla reciclada.
- El Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares, o en su defecto el Director de las Obras, podrá establecer el empleo de aditivos, tales como activantes o agentes rejuvenecedores, que recompongan y aporten las fracciones que hayan desaparecido o se encuentren en proporciones menores a las necesarias en el ligante envejecido.
- La razón entre la estabilidad Marshall y la deformación Marshall de la mezcla reciclada será inferior a 8 kN/mm.

Vistos estos requisitos, es importante comentar que la redacción de los mismos tuvo lugar en el año 2001, y que durante las dos últimas décadas la reutilización de fresado ha sido ampliamente estudiada y se han obtenido avances muy significativos en esta materia. En cualquier caso, es evidente que estas consideraciones son una buena base y sirven de guía para llevar a cabo cualquier estudio de reutilización de fresado en mezclas bituminosas.

### Influencia del fresado en el comportamiento mecánico de la mezcla bituminosa

Llegado a este punto, es necesario hacer un repaso por la bibliografía publicada en esta materia y repasar cómo afecta el uso de fresado al comportamiento mecánico de las mezclas. Es evidente que no es aconsejable extrapolar las conclusiones particulares que puedan derivar de un estudio específico, ya que en cada caso influyen unas condiciones determinadas, pero sí es posible trazar unas conclusiones generales que son compartidas de forma general y aceptadas por la comunidad científica. En este sentido, se recogen en los siguientes puntos, de forma resumida, algunas de las conclusiones más destacadas en esta materia.

- La presencia de betún envejecido, endurecido y con mayor rigidez, repercute generalmente en un incremento de la rigidez de la mezcla [85,86]. Esto a su vez suele traducirse en una mayor probabilidad de fallo a fatiga y de rotura frágil a baja temperatura [87-89]. Esta probabilidad de fallo guarda una relación directa con el porcentaje de fresado utilizado, siendo esto una de las principales razones por las que se han establecido límites en dicho porcentaje [90,91].

En relación con lo anterior, Bennert y Dongre (2010) establecen que no es posible asumir un incremento lineal de la rigidez a medida que se incrementa el contenido de fresado, especialmente con contenidos altos de este. En estos casos, el incremento en la rigidez está más condicionado por el grado de mezcla entre el betún envejecido y el de aportación [92].

A modo de ejemplo, en el *NCHRP report 752* se muestra que mezclas con un 55% de fresado muestran valores de rigidez hasta un 60% superiores en comparación con sus mezclas convencionales análogas [86].

- Varios autores muestran en sus estudios que mezclas con un 40% de reemplazo obtienen mejores resultados en términos de fatiga que sus análogas convencionales. El motivo de estos resultados encuentra su justificación en la diferencia de rigidez entre estas mezclas, y por tanto, en la diferente respuesta a nivel de tensiones y deformaciones se produce bajo las mismas condiciones de sollicitación, pudiendo en algunos casos jugar a favor de las mezclas con mayor rigidez [93-95].

- En términos de susceptibilidad al agua, el recubrimiento previo existente en los áridos del fresado tiene generalmente un efecto positivo, evitando, o al menos, dificultando en gran medida la penetración del agua. Debido a esto, las mezclas con altos contenidos de fresado suelen presentar mejores resultados [96,97]. Sin embargo, otros factores como, por ejemplo, un mal mezclado entre betún envejecido y betún virgen pueden causar problemas en este sentido [91].
- El comportamiento en términos de resistencia a la deformación permanente tiende a mejorarse con la inclusión de fresado en la mezcla. La mayor rigidez de la mezcla y la dureza del betún ejercen un efecto positivo en este sentido [97,98].
- Cuando se utilizan aditivos para modificar las características del betún envejecido, debe tenerse en cuenta que el efecto de estos puede durar más allá de la puesta en obra del pavimento. Estos cambios provocados en el betún final pueden provocar que en las primeras etapas, antes de alcanzar el equilibrio, se produzca un comportamiento no deseable y aparezcan problemas de deformaciones permanentes [91,99].

Como se puede observar, la utilización de fresado tiene la particularidad de que, por un lado, puede suponer un beneficio y mejorar el comportamiento de la mezcla ante determinados modos de fallo pero por otro, puede suponer un inconveniente y reducir la vida útil de la mezcla en determinadas situaciones. Por este motivo, cuando se pretende disponer de una tasa de sustitución muy alta es conveniente recurrir a alguna de las siguientes técnicas:

- Utilización de un betún de aportación más blando.
- Utilización de aditivos.
- Utilizar técnicas de fabricación de mezclas bituminosas semi-calientes.

En cuanto a la utilización de un betún más blando, destacar simplemente que esto se justifica desde el punto de vista de que, una vez se consiga un grado de mezcla adecuado entre ambos betunes, el resultado final será un betún con unas características intermedias a ambos, que deberán ser adecuadas al uso particular de la mezcla.

Por su parte, el efecto de las técnicas de mezclas semi-calientes no resulta tan evidente. En este caso, la mejoría en el comportamiento se asocia a que, al fabricar a una menor temperatura, el betún virgen sufre un menor envejecimiento durante esta fase y de esta manera se compensa el efecto del betún envejecido [100]. También se asocia un mejor comportamiento a la mejoría en la trabajabilidad de la mezcla y a la mejor envuelta de áridos conseguida utilizando este tipo de técnicas [101].

En el desarrollo de esta tesis, el uso de aditivos es la técnica seleccionada como alternativa para recuperar el betún envejecido, y es por tanto preciso detenerse un poco más en su estudio. Existen diversos productos que se comercializan para tal fin, contrastados en su uso y avalados por experiencias previas. Estos productos se pueden clasificar como agentes fluidificantes y agentes rejuvenecedores. La principal diferencia entre ambos está en que, mientras un fluidificante es un aditivo que reduce la viscosidad del betún, un rejuvenecedor sirve para recuperar tanto las propiedades físicas perdidas como para reconstituir la composición química de este.

Un aspecto fundamental a tener en cuenta cuando se utilizan este tipo de aditivos y que va a condicionar el resultado final es la capacidad que tengan estos de difundirse por todo el betún [102]. Para conseguir una buena difusión, se pueden incorporar aplicándolos directamente sobre el fresado o bien mezclados con el betún de aportación [96,103]. En cualquier caso, las variables con mayor influencia en la difusión final de estos aditivos son el tiempo de mezclado y la temperatura [104,105].

En cuanto a la influencia que el uso de este tipo de aditivos tiene sobre el comportamiento mecánico de la mezcla bituminosa, es difícil establecer unas conclusiones absolutas ya que, a la heterogeneidad del propio fresado utilizado en cada caso se le une la heterogeneidad propia de los rejuvenecedores debido a la variedad de tipos existentes. A continuación, se muestran algunas de las conclusiones extraídas de diversos estudios, relacionadas directamente con el empleo de rejuvenecedores.

- La forma más habitual de incorporar los rejuvenecedores a la mezcla es mezclándolos previamente con el fresado a altas temperaturas. El tipo y el contenido de rejuvenecedor son dos variables muy importantes que deben ser tenidas en cuenta durante el diseño [106].
- Los rejuvenecedores comúnmente utilizados suelen estar compuestos por aceites ligeros, con un contenido alto de componentes aromáticos. Otra alternativa es la combinación de estos aceites con componentes químicos. Ambos tienen la capacidad de restablecer las propiedades reológicas del betún [107].
- El uso de rejuvenecedores de origen vegetal es adecuado si su contenido en asfáltenos es suficiente [108]. Un estudio llevado a cabo por Hugener *et al.* (2014) revela que el uso de este tipo de rejuvenecedores tiene un efecto positivo sobre el betún envejecido y es una buena opción en técnicas de reciclado en frío, tanto in situ como en planta [109].

- Zaumanis *et al.* (2015) evaluaron el potencial de seis productos distintos como rejuvenecedores del betún, diferenciando entre productos con origen vegetal, orgánico o derivados del petróleo. En general, estos aditivos reducen la viscosidad a temperaturas intermedias (25°C) a niveles de un betún virgen. No ocurre lo mismo a temperaturas altas, donde la viscosidad se mantiene en valores superiores. En términos de comportamiento a fatiga, los rejuvenecedores con origen vegetal y orgánico presentan una mejoría significativa en este sentido; sin embargo, los derivados del petróleo no parecen tener efecto. Finalmente, se recomienda que en cada caso se determine el contenido óptimo de rejuvenecedor [110].
- En un estudio elaborado por Mogawer *et al.* (2015) donde se utilizaron tres tipos de rejuvenecedores en una mezcla con alto contenido de fresado, se muestra cómo el betún mejora sus propiedades en términos de resistencia a la fatiga. La mezcla resultante presenta menor contenido de huecos, un mejor rendimiento en términos de fisuración, pero empeora su comportamiento en términos de deformación permanente y sensibilidad al agua [111].
- Im *et al.* (2014) evalúan el efecto de tres rejuvenecedores convencionales en una mezcla con un contenido de fresado del 19%, concluyendo que el uso de estos supone una mejoría en términos de fisuración por fatiga y susceptibilidad al agua [112].
- El uso de aceite de freír usado también ha sido evaluado como posible rejuvenecedor. En un estudio llevado a cabo por Asli *et al.* (2012), un betún envejecido que se asemeja en sus características a un betún 40/50 alcanza las características de un betún 80/100 tras la incorporación de un contenido de aceite de freír usado del 3-4% (evaluado a través de la penetración, el punto de reblandecimiento y la viscosidad) [113]. En este sentido, Zargar *et al.* (2012), tras la realización de un análisis químico, demuestran que el ratio alfaftenos/maltenos (reconocido indicador del envejecimiento) se reduce tras la incorporación de aceite de freír usado [114].

Por último, es necesario comentar que la tendencia actual parece ir encaminada a incrementar el porcentaje de fresado lo máximo posible, y prueba de ello son algunos estudios donde se contempla la posibilidad de diseñar mezclas 100% recicladas. No cabe ninguna duda de que esta solución es ideal desde el punto de vista de la economía circular, pero todavía queda camino por recorrer y siguen existiendo ciertas restricciones que impiden que hoy en día esto sea una práctica habitual. La necesidad de adaptar las plantas asfálticas, de adaptar la metodología de diseño y de mejorar los procesos de obtención del fresado son los grandes inconvenientes que actualmente limitan el uso de muy altos porcentajes de fresado en mezclas bituminosas [81].

### 2.2.3. Neumáticos al final de su vida útil (NFU)

Los neumáticos son una pieza fundamental en el funcionamiento de los automóviles y de ellos depende en gran medida el agarre y la tracción con el pavimento. Un neumático, único punto de contacto del vehículo con la carretera, es un producto de alta tecnología y que, por la seguridad del usuario, cumple un riguroso estándar de calidad que le permite mantener sus prestaciones durante toda su vida útil. En su fabricación se emplean más de 200 componentes diferentes, partiendo de una base de caucho a la que se añaden gran número de productos químicos y diversos elementos metálicos y textiles. Por sus especiales cualidades de resistencia son prácticamente indestructibles [115,116].

Estas características, que hacen del neumático un excelente producto durante su uso en servicio, suponen un gran inconveniente al final de su vida útil. De hecho, los neumáticos suponen un grave problema ecológico, estimándose en más de 10 siglos el tiempo necesario para que se degraden y desaparezcan de la naturaleza. Además, una gestión inadecuada puede provocar serios problemas medioambientales y de salud pública. Algunos de los problemas más destacados asociados a la generación y tratamiento de NFU se muestran a continuación [116,117].

- Los depósitos de neumáticos presentan un riesgo potencial para incendiarse, provocando la emisión de humo ácido con el correspondiente riesgo para la salud de las personas y el medioambiente. Además, debido a su elevado poder calorífico, estos incendios son prácticamente inextinguibles y pueden durar semanas. Tras el incendio dejan un residuo aceitoso.
- Los neumáticos ocupan espacio en los vertederos y en otras zonas donde son depositados ilegalmente.
- Los depósitos también suponen un riesgo para la salud de las personas en el sentido de que son un caldo de cultivo para los mosquitos. Los neumáticos mojados proporcionan a los mosquitos el lugar ideal para su reproducción, ya que simulan muy bien el hábitat natural de estos insectos. Enfermedades como el dengue, la fiebre amarilla o las producidas por el virus chikungunya o el virus del Nilo occidental son susceptibles de propagarse por este medio [118].

Para minimizar estos efectos negativos de los neumáticos usados es necesario que exista una buena gestión de los mismos. En la Unión Europea más del 90% de los neumáticos usados se están gestionando de una forma responsable. Este cometido se está llevando a cabo mediante tres sistemas diferentes de gestión [119]:

- Responsabilidad extendida al productor (*Extended Producer Responsibility*). Bajo este sistema, el productor es el responsable por ley de que los neumáticos que ha generado sean gestionados correctamente cuando estos alcancen el final de su vida útil. Este sistema está presente en 21 países, incluido España. La fórmula habitual es que la gestión de los neumáticos sea llevada a cabo por una entidad creada a iniciativa de los principales fabricantes de neumáticos.
- Mercado liberalizado (*Free market*). Bajo este sistema, la legislación fija los objetivos que deben cumplirse pero no designa a ningún responsable. De esta forma, se fomenta que los operadores de la cadena de recuperación puedan contratar en condiciones de libre mercado, actuando conforme a la legislación. Este sistema está implantado en 9 países de la Unión Europea.
- Responsabilidad gubernamental mediante impuestos (*Government responsibility through a tax*). Bajo este sistema, presente solamente en 2 países, la responsabilidad en la gestión de los neumáticos recae en el propio Gobierno, financiada mediante la aplicación de impuestos a los productores.

En cuanto a la gestión que se hace de los neumáticos usados, independientemente del sistema aplicado, según datos de la *European Tyre & Rubber manufacturer's association*, en 2015 un 92% de los neumáticos gestionados en Europa fueron reutilizados (18%), reciclados (46%) o enviados a recuperación energética (28%). En otras regiones, como Estados Unidos o Japón, la tasa de recuperación también se sitúa cercana al 90%.

A nivel estatal, en España se dedica un apartado del Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022 a los neumáticos al final de su vida útil (NFU)<sup>1</sup>, con el objetivo de asegurar una correcta gestión de los mismos. Este capítulo del plan se estructura en un repaso a la legislación aplicable, un diagnóstico de la situación actual, unos objetivos y unas orientaciones para conseguirlos.

---

<sup>1</sup> Como curiosidad, comentar que el término de neumáticos al final de su vida útil sustituye en la actualidad al término habitualmente utilizado de neumáticos fuera de uso. Este cambio tiene su origen en la Decisión de la Comisión 2014/955/UE, de 18 de diciembre de 2014, por la que se modifica la Decisión 2000/532/CE, sobre la lista de residuos, de conformidad con la Directiva 2008/98/CE, la cual cambia la denominación del código LER 16 01 03, utilizando el término neumáticos al final de su vida útil en lugar de neumáticos fuera de uso. Destacar que, en relación con el acrónimo utilizado, en algunos casos, como por ejemplo en el PEAR, se sigue utilizando el acrónimo NFU. En otras fuentes, es posible encontrarse con el acrónimo NRVU.

En la parte legislativa, el PEMAR hace referencia al Real Decreto 1619/2005, de 30 de diciembre, sobre la gestión de los neumáticos fuera de uso. Este Real Decreto tiene como objetivos fundamentales prevenir la generación de neumáticos fuera de uso, establecer el régimen jurídico de su producción y gestión, así como fomentar, por este orden, su reducción, reutilización, reciclado y otras formas de valorización, todo ello para proteger el medioambiente y avanzar hacia una economía circular. En este Real Decreto, se establecen las obligaciones de los agentes económicos que intervienen en el ciclo de vida del neumático y se indica que los productores deberán adoptar las medidas necesarias para alcanzar, como mínimo, los objetivos ecológicos de gestión de residuos contemplados en el plan de gestión de residuos vigente.

Estos objetivos, fijados por el PEMAR 2016-2022, se dividen en objetivos cualitativos y objetivos cuantitativos. De los cualitativos destacar como grandes objetivos el asegurar la correcta gestión ambiental de los NFU y fomentar la preparación para la reutilización y el reciclaje, con el fin de lograr los objetivos cuantitativos fijados por el plan, los cuales se recogen en la siguiente tabla.

Tabla 2-5. *Objetivos del PEMAR 2016-2022 relativos a la gestión de los NFU*

Actividad	2015	2018	2020
Preparación para la reutilización	>10%	>13%	>15%
Reciclaje	>40%	>42%	>45%
Valorización energética	<50%	<45%	<40%

*\*Los porcentajes están referidos al total recogido en todo el territorio nacional en los años que se indican.*

Para lograr estos objetivos, el PEMAR establece unas orientaciones estratégicas. Como es lógico, en primer lugar, se hace valer la jerarquía de residuos (reducción, reutilización, reciclado y otras formas de valorización), y se le da mayor importancia al impulso de la utilización de neumáticos recauchutados como instrumento para optimizar la gestión de residuos y favorecer la prevención de su generación así como el alargamiento del ciclo de vida. En segundo lugar, siguiendo la jerarquía, se sitúa el reciclado, recogido a través de la promoción de la utilización de los materiales procedentes de los NFU. Como última alternativa se sitúa a la recuperación energética.

Antes de ahondar en las distintas opciones de reciclaje, y especialmente en el uso en mezclas bituminosas, es necesario analizar la situación actual en lo que respecta a generación y tratamiento de NFU. En la Tabla 2-6 se recogen algunos datos de producción y tratamiento de los neumáticos usados para diferentes regiones del mundo, publicados por la *Tire and Rubber Association of Canada* [120].

Tabla 2-6. Datos de producción y uso de neumáticos usados.

Región	Año	Producción (millones de neumáticos) <sup>1</sup>	Recuperación energética (%)	Reciclado (%)	Vertedero, almacenaje y otros (%)
Estados Unidos	2005	292	53	33	14
Europa	2006	250	41	43	16
China	-	112	-	-	-
Japón	2006	80	70	15	15
México	2004	30	0	90	10
Brasil	-	27	69	13	18
Corea del Sur	2003	23	77	16	7
Canadá	2003	22	20	75	5
Australia	2006	20	22	8	70
Malasia	-	14	-	-	-
Sudáfrica	2003	12	-	-	-
Irán	2006	10	-	-	-
Israel	2003	7	-	-	-
Nueva Zelanda	2005	4	0	15	85

<sup>1</sup> Se excluyen los neumáticos exportados y reutilizados.

Destacar de todos estos datos la existencia de grandes diferencias en la forma de gestión entre las distintas regiones. En primer lugar, es posible destacar como un buen ejemplo de gestión a países como México o Canadá, donde el reciclado es la opción más utilizada. En un escalón intermedio estarían Europa y Estados Unidos, ambas con un porcentaje reducido de neumáticos retirados a vertedero pero donde la valorización energética tiene un peso similar al del reciclado.

En tercer lugar, se situarían países como Japón, Corea del Sur o Brasil, todos ellos también con un reducido porcentaje de neumáticos retirados a vertedero pero donde la valorización energética es la primera alternativa de gestión, con porcentajes cercanos al 70%. La gestión de Australia y Nueva Zelanda sería por tanto la opción menos recomendable, con un porcentaje de retirada a vertedero o almacenaje muy alto.

Para encontrar datos más actuales de producción y gestión de los neumáticos usados en España es necesario remitirse a los datos publicados por las dos entidades que gestionan los dos sistemas integrados de gestión (SIG) constituidos hasta la fecha en España: “SIGNUS Ecovalor S.L.” y “Tratamiento de Neumáticos Usados S.L. (TNU)”. Estas entidades publican anualmente una memoria donde se recogen, entre otras cosas, los diferentes datos de producción y uso de NFU. En la siguiente tabla se recogen algunos de los datos más significativos relativos al año 2017 [115,121].

Tabla 2-7. Cantidades y usos de los NFU recogidos en España durante 2017.

Actividad	TNU	SIGNUS
NFU recogidos (tn)	72.618	188.367
Preparación para la reutilización (%)	13,96	11,91
Reciclaje (%)	40,29	50,26
Valorización energética (%)	45,75	36,86

Estos datos muestran cómo la valorización energética representa un porcentaje bastante importante dentro de las alternativas de gestión, siendo necesario en el caso de España rebajar ese porcentaje si se quiere cumplir con las exigencias del PEMAR. En este sentido, y relacionado directamente con esta tesis, una de las alternativas de reciclaje con mayor potencial es el uso de NFU en la fabricación de mezclas bituminosas.

De hecho, el propio PEMAR contempla este uso como una de las alternativas de reciclaje, junto con otros usos en obras civiles (rellenos, instalaciones deportivas o recreativas, parques y jardines, etc.). En concreto, en relación con el uso en mezclas bituminosas, el PEMAR establece que se promoverá el establecimiento de porcentajes mínimos de uso de este material en obra pública mediante la introducción de criterios que así lo prevean, por ejemplo, a través de la Contratación Pública Verde.

Sin embargo, no se establece ningún objetivo cuantitativo, como sí ocurría en el anterior plan (2008-2015). En este anterior plan, se establecía un 55% como objetivo mínimo de reciclaje para el año 2015, y se imponía un objetivo de reciclar el 45% del caucho en mezclas bituminosas de carreteras, estableciendo esta aplicación como prioritaria y afirmando que, según estimaciones, la apertura del mercado de carreteras al caucho podría dar salida al 40% de los NFU generados.

Sin embargo, el uso de NFU en mezclas bituminosas no está siendo una alternativa muy utilizada, y los números están muy lejos de ese objetivo. Según se recoge en la memoria anual del año 2017 elaborada por SIGNUS Ecovalor S.L., del total del granulado de caucho producido, solamente el 1,6% es destinado a la fabricación de mezclas bituminosas [121]. Según datos de TNU, este porcentaje se reduce a un valor inferior al 1% [115].

Es evidente por tanto que no se está consiguiendo el resultado esperado y que, tal y como se recoge textualmente en la memoria presentada por SIGNUS, el granulado de caucho procedente de NFU se está utilizando en mezclas bituminosas en un porcentaje muy inferior al verdadero potencial que tiene esta aplicación. En este mismo sentido, la *European Tyre & Rubber Manufacturer's Association* destaca que el potencial del sector del asfalto en el reciclado de neumáticos es enorme, pero achacan esta falta de uso a que esta técnica llega un poco tarde para entrar a competir con el resto de productos habitualmente utilizados para modificar los betunes [122].

Pese a estos datos, España se sitúa como uno de los países con mayor tasa de reciclado de neumáticos mediante su incorporación a las carreteras [123]. En concreto, según datos publicados por SIGNUS, hasta el año 2017 en España se contabilizan cerca de 300 actuaciones de obras ejecutadas con polvo de NFU en toda España, equivalente a unos 1.600 km. A estas carreteras se les asocia un consumo de unas 17.000 toneladas de polvo de caucho procedente de neumáticos usados [124].

#### Utilización del polvo de NFU en la fabricación de mezclas bituminosas

Para impulsar el uso del polvo de NFU en la fabricación de mezclas bituminosas, el PEMAR menciona al Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas, editado por el CEDEX como manual de referencia para este fin. Este documento, elaborado en el año 2007, es una guía muy completa que recoge de una forma muy detallada todas las fases del proceso de fabricación de este tipo de mezclas [125]. Desde el punto de vista técnico, existen dos técnicas para la incorporación de polvo de NFU en una mezcla bituminosa, conocidas como “vía húmeda” y “vía seca”.

La técnica de vía húmeda consiste en la mezcla del polvo de NFU con el betún para su posterior empleo como ligante en la mezcla bituminosa. Cuando el polvo de caucho y el betún se mezclan a alta temperatura, las partículas de caucho se reblandecen, absorben los componentes más ligeros del betún y se hinchan. Con el hinchamiento disminuye las distancias entre partículas y el ligante se hace más viscoso. Este fenómeno suele denominarse digestión o maduración. Un betún con el 15% de polvo de caucho puede aumentar su viscosidad hasta 10 veces su valor original. El contenido de polvo de NFU normalmente utilizado puede variar entre el 8 y el 22% dependiendo del resultado final buscado [125].

Por su parte, en la técnica de vía seca, el caucho se incorpora directamente en el mezclador de la central de fabricación de mezclas bituminosas como si se tratase de un árido. Dependiendo del tamaño de las partículas de caucho, de la temperatura y del tiempo de interacción entre betún y caucho, el proceso de digestión antes comentado tendrá lugar en mayor o menor grado, sin la garantía de que se produzca en todas las partículas [125].

En el caso más habitual, parte de las partículas de caucho, las más pequeñas, interaccionarán con el betún y modificarán su reología de forma similar a la vía húmeda, y otra parte, las partículas más gruesas, no tendrán una interacción tan fuerte y actuarán como un árido elastomérico dentro del esqueleto mineral de la mezcla, aunque superficialmente también existirá una reacción con el betún que dará cierta cohesión a ambos materiales. Contenidos de polvo de NFU entre el 0,5 y el 2% del peso total de la mezcla (10-30% sobre el peso del betún) son los habituales cuando se utiliza esta técnica [125].

Debido a que la incorporación por vía seca es la técnica de interés para el desarrollo de esta tesis, el contenido de este apartado se va a centrar sobre las consideraciones y particularidades de esta. Más allá del potencial beneficio en el comportamiento mecánico, esta técnica de fabricación es una forma relativamente económica de obtener mezclas bituminosas modificadas con polvo de NFU, y por consiguiente, una alternativa muy interesante para consumir este residuo. Cuestión esta última muy importante ya que, como se ha visto, aún se está muy lejos de lograr una reutilización en esta aplicación a la altura de su potencial y de las expectativas [125].

De hecho, en la memoria anual presentada por TNU en 2017 se indica que desde esta entidad se fomenta el uso de la vía seca como alternativa para el reciclado de los NFU. Volviendo sobre los cerca de 1.600 km de carretera ejecutados en España, pese a que la técnica por vía seca solo se ha empleado en un 13% de los casos esto ha supuesto un 24% del total de polvo de caucho consumido, quedando patente la mayor capacidad de esta técnica para reciclar este material [124].

Sin embargo, para poder hablar de polvo de NFU susceptible de ser utilizado en mezclas bituminosas primero es necesario definir con claridad de qué se trata y cómo se obtiene este producto. El polvo de neumático es el resultado de todo un proceso de transformación de los NFU. Este proceso de transformación comienza con una primera fase donde los neumáticos son triturados por medio de un sistema de cuchillas. Dependiendo de las dimensiones de las cuchillas y de la criba que se coloque a la salida de la trituradora, se obtendrán trozos de neumáticos que variaran entre los 20 y 400 mm de tamaño.

Estos trozos pasan en una segunda etapa hacia una segunda fase de triturado, donde se reduce su tamaño por debajo de los 25 mm mediante diferentes tipos de molinos. Durante esta fase son removidos el acero y el textil mediante el uso de diferentes técnicas (separadores magnéticos, sistemas de aspiración, etc.). El material de caucho que en esta fase no se ha separado para su comercialización es introducido nuevamente en uno o varios molinos de granulación, donde se consiguen tamaños por debajo de 10 mm o bien, en un molino de finos, donde se obtiene finalmente el polvo de caucho, que con un tamaño inferior a 0,8 mm es idóneo para ser utilizado en mezclas bituminosas.

En cuanto a los distintos métodos para la obtención de granulados finos y polvo de caucho, los más destacados son [126]:

- Molido a temperatura ambiente
- Molido criogénico (baja temperatura con nitrógeno líquido)
- *Wet-grinding* (molido en un medio líquido, generalmente agua)
- *Hydro jet size reduction* (molido mediante agua a presión)

Las propiedades del polvo de NFU obtenido, y en especial la rugosidad y la forma de las partículas, van a depender en gran medida del método de molido aplicado. El proceso a temperatura ambiente es el método más utilizado y probablemente el más rentable para producir el polvo de NFU. Con este método se obtienen partículas con forma irregular, rasgadas y con una superficie específica relativamente grande, características que favorecen la interacción con el betún.

Por su parte, el método criogénico da como resultado partículas más lisas y de forma más regular, resultando por tanto en una superficie específica menor. Por último, los otros dos métodos se corresponden con métodos patentados cuyo objetivo es mejorar las características finales del producto. En particular, el método *hydro jet size reduction* produce partículas muy rugosas y con una gran superficie específica y por tanto, atractivas para su uso en mezclas bituminosas. Sin embargo, este método aún no está muy desarrollado y su implantación no está muy extendida. En la Figura 2-3 se muestran algunos ejemplos de las diferentes partículas obtenidas mediante los distintos métodos, analizadas mediante microscopia electrónica de barrido [126].



Figura 2-3. Partículas de polvo de NFU generadas mediante distintos procedimientos. SEM análisis. Barra de escala de 200 µm. Adaptado de [126]

### Diseño de mezclas bituminosas modificadas con polvo de NFU por vía seca.

Una vez visto de forma general cómo se obtiene el polvo de NFU, es necesario pasar a evaluar las distintas cuestiones que afectan al diseño y fabricación de las mezclas bituminosas que incorporan este material, en este caso, por vía seca. En primer lugar, como una buena referencia, conveniente destacar como marco normativo básico a nivel estatal la Orden circular 21/2007 sobre el uso y especificaciones que deben cumplir los ligantes y mezclas bituminosas que incorporen caucho procedente de neumáticos al final de su vida útil (NFU).

En esta orden se indican las limitaciones en el uso de esta técnica y se establece que para el diseño, fabricación, puesta en obra y control de calidad de las mezclas con adición de caucho por vía seca se deberá atender a lo establecido en los anejos del ya mencionado Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas elaborado por el CEDEX. Algunas de las consideraciones más destacadas son [125]:

- En carreteras con categorías de tráfico pesado T3 a T4, se podrán emplear en todo tipo de capas las mezclas bituminosas en caliente con adición de caucho (vía seca).
- Las mezclas bituminosas en caliente modificadas con polvo de caucho serán de aplicación en capas de rodadura e intermedia. Se podrán fabricar con polvo de caucho cualquiera de las mezclas bituminosas previstas para estas capas en los artículos 542 y 543 del PG-3.
- Cuando la dotación de polvo de caucho sea igual o inferior al 0,5% en peso de la mezcla bituminosa no será necesario tenerlo en cuenta para la elaboración de la granulometría conjunta de áridos. Para porcentajes superiores de polvo de caucho se deberá determinar la curva combinada de áridos y polvo de caucho.
- Se establece un contenido de ligante mínimo superior al establecido por el PG-3. Comparando con los requisitos del PG-3 coetáneo, para las mezclas clasificadas como densas y semidensas el contenido de ligante mínimo se incrementa de un 4,75% a un 5,00% para capa de rodadura y de un 4,00% a un 4,25% para capa intermedia (porcentajes referidos al peso del árido seco, incluido el polvo mineral).
- La fórmula de trabajo fijará el tiempo mínimo que debe transcurrir entre la fabricación de la mezcla y la puesta en obra, que no será inferior en ningún caso a 30 min. El tiempo de amasado se deberá aumentar, respecto al de una mezcla convencional, para garantizar el mezclado homogéneo del polvo de caucho con los áridos y la envuelta con el betún.

Es necesario destacar que, pese a que todas estas consideraciones fueron redactadas en el año 2007, hoy en día continúan siendo el único marco con cierto carácter normativo en este respecto. De hecho, la única referencia a la vía seca recogida en el actual PG-3 no aporta nada nuevo y se limita a recoger en un párrafo lo también señalado en el Plan Nacional Integrado de Residuos:

- Según lo dispuesto en el apartado 8 del Plan Nacional Integrado de Residuos 2008-2015, se fomentará el uso de polvo de caucho procedente de la trituración de neumáticos fuera de uso, siempre que sea técnica y económicamente posible.

### Influencia del polvo de NFU en el comportamiento de las mezclas bituminosas modificadas por vía seca.

Visto el marco normativo y a tenor de que el uso de polvo de NFU por vía seca aún está lejos de su total implantación en este sector, es necesario profundizar en el estudio de esta técnica en busca de un mayor conocimiento y mejorar la confianza que actualmente se tiene sobre ella. En este sentido, es necesario destacar que con la incorporación de caucho procedente de NFU en mezclas asfálticas no solo se consigue dar una salida medioambientalmente sostenible a este residuo, sino que también existe un potencial beneficio para el comportamiento mecánico de dicha mezcla.

Se ha demostrado que, tras un proceso de digestión adecuado, el caucho actúa como modificador de la reología de los ligantes asfálticos, proporcionado a estos unas características potencialmente beneficiosas para ciertas aplicaciones. Durante el proceso de digestión, las partículas de caucho aumentan progresivamente su volumen debido a la absorción de las fracciones aromáticas del betún. Alrededor de la partícula de caucho se va formando una especie de gel que va integrándose poco a poco en el betún. Esta integración será mejor si se somete a agitación (como sucede en la vía húmeda). Si el tiempo o la energía de agitación se incrementan lo suficiente, la partícula de caucho llegaría a desaparecer por completo. En general, este proceso de digestión se verá favorecido [127]:

- A mayor temperatura.
- A mayor tiempo de contacto.
- Con el empleo de partículas de caucho de menor tamaño.
- A mayor contenido de fracciones ligeras en el betún.
- A mayor energía de mezclado.

Debido a que en el proceso por vía seca no es viable favorecer la interacción entre betún y caucho por medios mecánicos (mediante mezclado), cobran especial importancia la temperatura, que estará limitada en cierto modo por el tipo de ligante utilizado; y el tiempo de contacto, que también tendrá ciertas limitaciones relacionadas, por ejemplo, con las distancias de transporte o con la capacidad técnica de mantener la mezcla a una temperatura elevada.

Esta interacción, dependiendo del grado en que se desarrolle y de las características de los materiales empleados, tendrá por tanto unas consecuencias sobre el comportamiento tanto del betún como de la mezcla resultante. De forma general, el aumento en la viscosidad del ligante favorece la envuelta de los áridos con películas de ligantes más gruesas sin que se produzcan escurrimientos o exudaciones.

Por otra parte, la adición de polvo de caucho también provoca cambios en la reología de los betunes, de manera que aumentan su elasticidad y resiliencia a temperaturas elevadas y disminuye la susceptibilidad térmica. Esto permite conseguir mezclas bituminosas con las siguientes características generales [125]:

- Mejor resistencia a la deformación permanente que las mezclas que utilizan betún convencional, por su elevada viscosidad, punto de reblandecimiento y resiliencia (ligante más elástico y viscoso a las temperaturas altas de servicio).
- Menor susceptibilidad a la temperatura que las mezclas bituminosas fabricadas con betún convencional.
- Mayor resistencia al agrietamiento, tanto por fatiga como por reflexión de las capas inferiores, que las mezclas fabricadas con betún convencional, debido a los elevados contenidos de ligante que permite esta técnica.
- Mayor resistencia al envejecimiento y a la oxidación que las mezclas convencionales por el potencial de utilizar mayores dotaciones de ligante y por la presencia de los antioxidantes del caucho de neumáticos.
- El empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas permite reducir el nivel sonoro de rodadura.
- Las mezclas bituminosas fabricadas con polvo de caucho pueden reciclarse en el futuro, cuando se agote su capacidad de servicio, mediante los procedimientos habituales [128].

En el caso de la modificación por vía seca, estos beneficios directamente relacionados con el proceso de digestión del caucho se conseguirán, en principio, en menor grado que en el caso de utilizar betunes mejorados con caucho por vía húmeda. No obstante, esta técnica presenta algunas ventajas adicionales como pueden ser [125]:

- Las mezclas bituminosas resultantes son más baratas que las mezclas fabricadas con betunes modificados por la vía húmeda.
- La tecnología es accesible para las empresas fabricantes de mezclas bituminosas sin la necesidad de tener la capacidad para modificar betunes.

Finalmente, es necesario destacar algunas de las conclusiones extraídas durante los últimos años en diferentes trabajos de investigación relacionados con la técnica de la vía seca.

- Moreno *et al.* (2011) evaluaron la influencia del tiempo de digestión (45, 90 y 120 min) y del contenido de polvo de NFU (0,5; 1.0 y 1,5% sobre el peso de la mezcla) en una mezcla discontinua del tipo BBTM 11A. Destacar de este estudio que las variaciones en el tiempo no provocaron cambios significativos en las propiedades volumétricas, pero si en el comportamiento mecánico (estabilidad y deformación Marshall), estableciendo el tiempo óptimo en 90 minutos. Sin embargo, el incremento en el contenido de polvo de NFU provoca un aumento en los huecos en mezcla y una pérdida de cohesión, aconsejándose un contenido máximo del 1,0% sobre el peso total de la mezcla [129].
- Moreno *et al.* (2012) en la continuación al estudio del punto anterior evaluaron el comportamiento mecánico de las mezclas tipo BBTM mediante el ensayo de sensibilidad al agua y el ensayo de rodadura. Los autores concluyen que tanto el tiempo de digestión como el contenido de polvo de NFU influyen significativamente en el resultado de estos ensayos. En este caso, para los ensayos ejecutados, los autores recomiendan como combinación óptima un tiempo de digestión de 45 minutos y un contenido de caucho entre el 0,5 y el 1,0% del peso total de la mezcla [130].
- Hernández-Olivares *et al.* (2006) realizaron un estudio sobre la incorporación de polvo de neumático por vía seca, implicando trabajos de laboratorio y la ejecución de un tramo de pruebas a escala real de 2,5 km de longitud ejecutado en una carretera secundaria. En sus conclusiones destacan que con un tiempo de digestión adecuado, mediante la modificación por vía seca es posible conseguir un mejor comportamiento global de la mezcla, destacando una mejor resistencia a la deformación permanente y una mayor durabilidad [131].
- Paje *et al.* (2010) realizaron un estudio donde evaluaban el comportamiento acústico de mezclas modificadas con polvo de neumático por vía seca. En este estudio concluyen que con la incorporación del polvo de neumático por esta vía es posible conseguir reducciones en el ruido generado por la interacción entre rueda y pavimento de hasta 2 dB(A) [132].
- Farouk *et al.* (2017) concluyen en su estudio que se consigue una mayor interacción entre caucho y betún cuando se utilizan partículas de caucho más finas. Los autores establecen que con el suficiente tiempo y contenido de betún, la absorción progresiva de la fracción de máltenos ocurre durante las

primeras 4 horas, alcanzando un incremento de casi el 50% en la masa de caucho. En este estudio, mezclas del tipo AC 14 modificadas con caucho resultaron en menor módulo resiliente que su análoga sin caucho. Comparando entre tamaños de partículas, las mezclas que fueron modificadas con partículas de caucho más finas (1,18 mm) resultaron en valores de módulo resiliente un 30% mayor que las mezclas que se modificaron con partículas más gruesas (5,0 mm) [133].

### Consideraciones medioambientales del uso del polvo de NFU en la fabricación de mezclas bituminosas

Las mezclas modificadas con polvo de NFU, tanto por vía seca como por vía húmeda, son una alternativa medioambientalmente más respetuosa que las mezclas convencionales. Esto lo ponen de manifiesto Wang *et al.* (2018) en su estudio, donde analizando diferentes cuestiones extraen las siguientes conclusiones [134]:

- El reciclado de los neumáticos mediante su incorporación en mezclas bituminosas es una alternativa medioambientalmente más respetuosa y con menor consumo de energía en comparación con la valoración energética o la retirada de los neumáticos a vertedero.
- La fabricación de mezclas con polvo de neumático supone un mayor consumo de energía en comparación con la fabricación de una mezcla convencional (mayor temperatura). Sin embargo, el uso de este material no supone ningún inconveniente a la hora de utilizar las diferentes técnicas existentes para reducir dicha temperatura (mezclas semi-calientes).
- El consumo de energía durante las fases de construcción y conservación es generalmente menor comparado con una mezcla convencional, implicando un mayor ahorro de energía si se considera el ciclo de vida completo (compensa el mayor consumo en la fase de fabricación).
- Las emisiones de O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> son muy similares a las producidas por una mezcla convencional. Sin embargo, a las mezclas modificadas con polvo de NFU se le asocian unas emisiones de CO y CH<sub>4</sub> significativamente menores.
- Como ya se ha comentado anteriormente, al uso de polvo de neumático se le asocian beneficios en términos de reducción del ruido generado al paso del tráfico.
- El lixiviado de este tipo de mezclas, tanto si se trata de modificación por vía húmeda como por vía seca, no representa ninguna amenaza para el medioambiente.



## **CAPÍTULO III – MATERIALES Y METODOLOGÍA**



### **3.1. ESTUDIO DE LA UTILIZACIÓN DE RESIDUOS INDUSTRIALES Y FRESADO EN MEZCLAS BITUMINOSAS**

En esta sección se detallan los materiales utilizados y la metodología seguida para evaluar la posible utilización de diferentes materiales alternativos en mezclas bituminosas. En primer lugar se muestra una descripción de las características y propiedades de los materiales utilizados, para posteriormente detallar el tipo de mezcla bituminosa seleccionada y la composición, tanto de la mezcla tomada como referencia como de las diferentes mezclas experimentales. Una vez vistas las composiciones, se muestra cómo ha sido el proceso de diseño, fabricación y estudio del comportamiento en laboratorio de dichas mezclas bituminosas.

#### **3.1.1 Residuos y subproductos de la industria siderúrgica**

En este apartado están recogidas las características de los residuos procedentes de la industria siderúrgica que han sido utilizados en esta investigación. En particular, para la fracción gruesa del árido (tamaño mayor de 2 mm) se han seleccionado dos tipos de escoria: escoria negra de horno de arco eléctrico y escoria LD. Por su parte, para la fracción fina (tamaño entre 2 y 0,063 mm) se ha seleccionado una arena de moldeo (moldeo en arena química).

En primer lugar, antes de analizar las propiedades de cada material, es conveniente repasar los requisitos que el PG-3 establece para los áridos. En este caso, adelantando que la mezcla a desarrollar será de tipo hormigón bituminoso para capa de rodadura, es de aplicación el artículo 542 de dicho pliego. Lo primero que se indica en este artículo es que los áridos a emplear en las mezclas bituminosas podrán ser de origen natural, artificial o reciclado, siempre que cumplan las especificaciones en él recogidas. Sin embargo, a continuación se especifica que el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares, o en su defecto el director de obra, podrá exigir propiedades o especificaciones adicionales cuando se vayan a emplear áridos cuya naturaleza o procedencia así lo requiriese.

Además, como vimos en el capítulo anterior de esta tesis, el PG-3 indica que en el caso de materiales en los que, por su naturaleza, no exista suficiente experiencia sobre su comportamiento deberá hacerse un estudio especial sobre su aptitud para ser empleado, que deberá ser aprobado por el director de obra. En este estudio deberá valorarse la susceptibilidad a cualquier tipo de meteorización o alteración fisicoquímica, la durabilidad a largo plazo y que dichos materiales no originen con el agua disoluciones que puedan causar daños a estructuras o contaminar corrientes de agua.

En el caso particular de las escorias, su valorización pasa por cumplir con lo requerido por la diferente legislación aprobada al respecto. En este caso, debido a que el estudio de estos materiales se realizó en el año 2015 la legislación aplicable en la Comunidad Autónoma de Cantabria en ese momento no era la misma que la actualmente en vigor. En particular, de las escorias utilizadas en esta investigación se evaluó el lixiviado y se determinaron la expansividad a 168 horas (EN 1744-1) y el contenido de cal libre (EN 1744-1).

En cuanto a la arena de moldeo seleccionada, únicamente es posible comentar que utiliza un ligante de tipo químico ya que, por cuestiones de confidencialidad, no es posible dar más detalles de su composición. De esta forma, cumpliendo con dicho acuerdo de confidencialidad, en esta tesis únicamente se presentan resultados relacionados con el desempeño de este material en las mezclas bituminosas, teniendo presente que en el caso de que este material pudiera ser utilizado en aplicaciones reales, deberán comprobarse el resto de los requisitos exigidos.

Por último, antes de mostrar las propiedades de cada material, es necesario establecer los requisitos relacionados con las propiedades físicas. Volviendo sobre el artículo 542 del PG-3, en este se establecen diferentes limitaciones en función de la fracción del árido. Así, para el árido grueso a utilizar en capas de rodadura, este será por lo general de una única procedencia y naturaleza, con la particularidad de que los áridos gruesos a emplear en capas de rodadura en categorías de tráfico pesado T00 y T0 no provendrán de canteras de naturaleza caliza, ni podrán fabricarse por trituración de gravas procedentes de yacimientos granulares.

También, este árido deberá estar exento de todo tipo de materias extrañas que puedan afectar a la durabilidad de la capa, y el contenido de finos determinado como el porcentaje que pasa por el tamiz 0,063 mm será inferior al cinco por mil en masa (norma EN 933-1). Con todo esto, además, el árido grueso a utilizar en capa de rodadura deberá cumplir con los requisitos recogidos en la siguiente tabla.

Tabla 3-1. Requisitos recogidos en el artículo 542 del PG-3 para el árido grueso

Propiedad	Categoría de tráfico pesado						
	T00	T0	T1	T2	T31	T32	T4
Partículas total y parcialmente trituradas (% en masa)	100	100	100	100	≥ 90	≥ 90	≥ 70
Partículas totalmente redondeadas (% en masa)	0	0	0	0	≤ 1	≤ 1	≤ 10
Índice de lajas (FI)	≤ 20	≤ 25	≤ 25	≤ 25	≤ 25	≤ 30	≤ 30
Coef. de Los Ángeles (LA)	≤ 20	≤ 20	≤ 20	≤ 20	≤ 25	≤ 25	≤ 25
Coef. de pulimento acelerado (PSV)	≥ 56	≥ 56	≥ 50	≥ 50	≥ 50	≥ 44	≥ 44

Por su parte, para el árido fino se establece que, en general, este deberá proceder en su totalidad de la trituración de piedra de cantera o grava natural y que deberá estar exento de todo tipo de materias extrañas que puedan afectar a la durabilidad de la capa. También se indica que el material que se triture para obtener árido fino deberá cumplir las condiciones exigidas al árido grueso sobre el coeficiente de Los Ángeles (LA), aceptándose que este sea ligeramente mayor en el caso de que, por sus características, el árido utilizado mejore alguna de sus propiedades, y en especial, la adhesividad con el ligante ( $LA < 25$  en capa de rodadura).

#### 3.1.1.1. Escoria negra de horno de arco eléctrico.

Las propiedades fundamentales de la escoria negra utilizada durante esta investigación se muestran en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2. Propiedades de la escoria negra

Propiedad	Norma	Resultado
Peso específico	EN 1097-6	3,735 g/cm <sup>3</sup>
Partículas total o parcialmente trituradas	EN 933-5	100%
Partículas totalmente redondeadas	EN 933-5	0%
Índice de lajas (FI)	EN 933-3	2
Coefficiente de los Ángeles (LA)	EN 1097-2	18
Coefficiente de pulimento acelerado (PSV)	EN 1097-8	59
Equivalente de arena (SE <sub>4</sub> )	EN 933-8	80
Absorción de agua (WA 24)	EN 1097-6	1,0 %
Expansividad (168 h)	EN 1744-1	0,2 %
Contenido de cal libre	EN 1744-1	< 0,1%

La escoria negra utilizada, por tanto, cumple con los requisitos más restrictivos recogidos por el PG-3 para ejercer la función de un árido grueso en una mezcla de tipo hormigón bituminoso. También se puede ver como esta escoria cumple con los límites establecidos por el Decreto 100/2018 en lo relativo a expansividad y contenido de cal libre.

Por último, en la Tabla 3-3 se muestran los resultados del análisis realizado sobre el lixiviado, donde se puede comprobar que este material cumple con todos los umbrales marcados por el actual Decreto 100/2018, de Valorización de Escorias en la Comunidad Autónoma de Cantabria.

Tabla 3-3. Análisis del lixiviado de la escoria negra (mg/kg de materia seca)

Parámetro	Resultado	Parámetro	Resultado
Bario	2,21	Molibdeno	0,2
Arsénico	< 0,10	Selenio	0,1
Cadmio	< 0,04	Antimonio	< 0,01
Cobre	< 0,5	Cloruro	68
Cromo total	< 0,1	Fluoruro	5,8
Mercurio	< 0,005	Sulfato	15
Níquel	< 0,1	Índice de fenol	< 0,1
Plomo	< 0,1	COD	23
Zinc	< 0,5	STD	-



Figura 3-1. Aspecto de la escoria negra

### 3.1.1.2. Escoria LD.

Del mismo modo que para la escoria negra, en la Tabla 3-4 se muestran las propiedades de la escoria LD utilizada en esta investigación.

Tabla 3-4. Propiedades de la escoria LD

Propiedad	Norma	Resultado
Peso específico	EN 1097-6	3,324 g/cm <sup>3</sup>
Partículas total o parcialmente trituradas	EN 933-5	100%
Partículas totalmente redondeadas	EN 933-5	0%
Índice de lajas (FI)	EN 933-3	6
Coficiente de los Ángeles (LA)	EN 1097-2	20
Coficiente de pulimento acelerado (PSV)	EN 1097-8	52
Equivalente de arena (SE <sub>4</sub> )	EN 933-8	80
Absorción de agua (WA 24)	EN 1097-6	-
Expansividad (168 h)	EN 1744-1	5,2%
Contenido de cal libre	EN 1744-1	-

En este caso, la escoria LD se ve limitada en su uso por el resultado del coeficiente de pulimento acelerado, de forma que solo podrá utilizarse en mezclas para capa de rodadura cuando el tráfico no supere la categoría T1. En cuanto a la expansividad, este material presenta un valor por encima del umbral marcado por el Decreto 100/2018, de Valorización de Escorias en la Comunidad Autónoma de Cantabria. Lamentablemente, en este caso no se dispone del valor del contenido de cal libre. En cualquier caso, antes de una posible puesta en obra será necesario garantizar que no van a existir problemas de expansividad, y de ser así, buscar las alternativas para evitar que esto suceda, por ejemplo, optimizando tratamiento de estabilización de las escorias.

Los resultados del análisis de lixiviado se muestran en la Tabla 3-5. En este caso, la precisión de los equipos de medida no es lo suficientemente buena como para determinar algunos de los parámetros. Existe cierta incertidumbre en los valores de Molibdeno, Selenio y Antimonio, y no se ha determinado el Índice de fenol. Debido a esto, antes de ejecutar cualquier actividad que pueda generar algún problema con el lixiviado, deberá realizarse una evaluación más precisa de estos parámetros.

Tabla 3-5. Análisis del lixiviado de la escoria LD (mg/kg de materia seca)

Parámetro	Resultado	Parámetro	Resultado
Bario	2,1	Molibdeno	< 1,0
Arsénico	< 0,5	Selenio	< 0,5
Cadmio	< 0,5	Antimonio	< 0,5
Cobre	< 0,5	Cloruro	< 200
Cromo total	< 0,5	Fluoruro	< 5
Mercurio	< 0,01	Sulfato	< 100
Níquel	< 0,5	Índice de fenol	-
Plomo	< 0,5	COD	< 100
Zinc	< 0,5	STD	-



Figura 3-2. Aspecto de la escoria LD

### 3.1.1.3. Arena de moldeo.

Tal y como se indicaba anteriormente, atendiendo al acuerdo de confidencialidad, las únicas propiedades determinadas para la arena de moldeo son las recogidas en la Tabla 3-6.

Tabla 3-6. Propiedades de la arena de moldeo

Propiedad	Norma	Resultado
Peso específico	EN 1097-6	3,324 g/cm <sup>3</sup>
Equivalente de arena (SE <sub>4</sub> )	EN 933-9	90
Absorción	EN 1097-6	2,2 %

Destacar como particularidad de esta arena que, previamente a su uso, ha sido necesario realizar un proceso de machaqueo ya que, como puede verse en la Figura 3-3, la arena ha sido suministrada en piezas. En particular, este machaqueo ha sido realizado en laboratorio mediante la utilización de una machacadora de mandíbulas de pequeñas dimensiones. Pese a que esta operación fue llevada a cabo sin mayores complicaciones, es necesario tener en cuenta que la posible presencia de partículas metálicas puede afectar negativamente durante este proceso, pudiendo ejercer una gran influencia en el desgaste del equipo.



Figura 3-3. Aspecto de la arena de moldeo

### 3.1.2. Fresado

En el PG-3, aparte de las restricciones ya comentadas en el capítulo anterior respecto de las cantidades de fresado a utilizar, se establece que el árido obtenido del material fresado cumplirá las mismas especificaciones que árido convencional, en función de la fracción que ocupe según su granulometría. Para determinar estas propiedades, una vez eliminado el betún, sobre el conjunto de áridos se ha determinado su granulometría (Figura 3-4) y las propiedades recogidas en la Tabla 3-7.

Tabla 3-7. Propiedades de los áridos recuperados del fresado

Propiedad	Norma	Resultado
Peso específico	EN 1097-6	2,698 g/cm <sup>3</sup>
Equivalente de arena (SE <sub>4</sub> )	EN 933-9	90

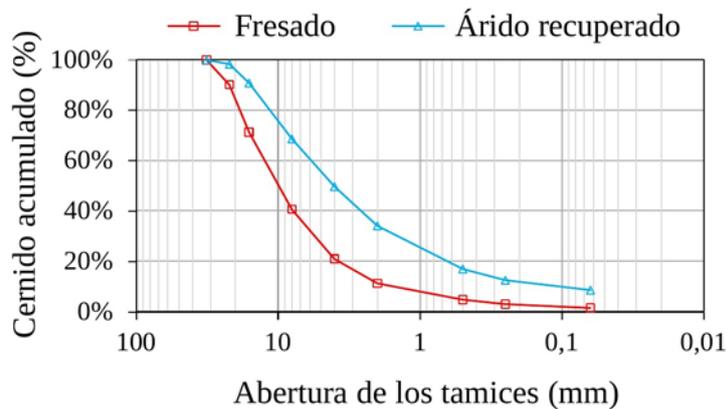


Figura 3-4. Granulometría del fresado

A partir de aquí, se han evaluado las propiedades del árido grueso, las cuales quedan recogidas en la Tabla 3-8. A la vista de estos resultados se observa cómo este árido muestra un valor para el coeficiente de Los Ángeles que limita su uso a categorías de tráfico por debajo de T31, y el coeficiente de pulimento acelerado baja esta categoría hasta la T32.

Tabla 3-8. Propiedades del árido grueso recuperado del fresado

Propiedad	Norma	Resultado
Peso específico	EN 1097-6	2,485 g/cm <sup>3</sup>
Partículas total o parcialmente trituradas	EN 933-5	100 %
Partículas totalmente redondeadas	EN 933-5	0 %
Índice de lasjas (FI)	EN 933-3	8
Coeficiente de los Ángeles (LA)	EN 1097-2	23
Coeficiente de pulimento acelerado (PSV)	EN 1097-8	46

Por otro lado, se ha determinado el contenido de betún y se han evaluado las características básicas del mismo. Para la extracción del betún se ha seguido la norma EN 12697-1, utilizando tricloroetileno para disolver el betún y una máquina centrífuga para separar esta disolución de los áridos. Posteriormente, para recuperar el betún del disolvente se ha utilizado un rotovapor, siguiendo la metodología propuesta por la norma ASTM D5404.

Las características básicas del betún se han evaluado a través del ensayo de penetración (EN 1426) y del ensayo de anillo y bola (EN 1427). Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3-9.

Tabla 3-9. Propiedades del betún recuperado del fresado

Propiedad	Norma	Resultado
Contenido de ligante (sobre el peso total)	EN 12697-1	4,2 %
Penetración (25°C)	EN 1426	10 mm <sup>-1</sup>
Temperatura de reblandecimiento	EN 1427	70,8 °C

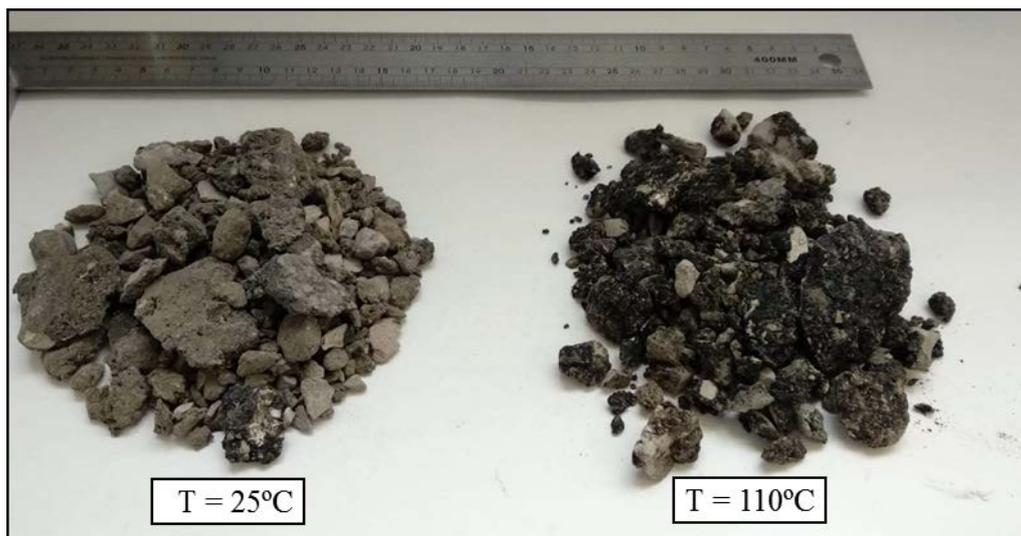


Figura 3-5. Aspecto del fresado

### 3.1.3. Áridos naturales

Durante esta investigación se han utilizado dos tipos distintos de áridos naturales. En concreto, árido ofítico para la fracción gruesa y árido calizo tanto para la fracción fina como para el polvo mineral de aportación. Estos áridos, proporcionados por una cantera de la región, cumplen con todas las especificaciones marcadas por el PG-3 para su utilización en mezclas bituminosas. En las Tablas 3-10 y 3-11 se recogen las propiedades del árido ofítico y del árido calizo respectivamente.

Tabla 3-10. Propiedades del árido ofítico

Propiedad	Norma	Resultado
Peso específico	EN 1097-6	2,937 g/cm <sup>3</sup>
Partículas total o parcialmente trituradas	EN 933-5	100 %
Partículas totalmente redondeadas	EN 933-5	0 %
Índice de lajas (FI)	EN 933-3	8
Coefficiente de los Ángeles (LA)	EN 1097-2	16
Coefficiente de pulimento acelerado (PSV)	EN 1097-8	> 56
Absorción	EN 1097-6	0,6 %

Tabla 3-11. Propiedades del árido calizo

Propiedad	Norma	Resultado
Peso específico (árido fino)	EN 1097-6	2,725 g/cm <sup>3</sup>
Peso específico (polvo mineral)	EN 1097-6	2,700 g/cm <sup>3</sup>
Coefficiente de los Ángeles (LA)	EN 1097-2	25
Equivalente de arena (SE <sub>4</sub> )	EN 933-9	78
Absorción	EN 1097-6	0,5 %



Figura 3-6. Aspecto de los áridos naturales

### 3.1.4. Ligantes y aditivos

Para este estudio se utiliza un ligante hidrocarbonado clasificado como un betún 50/70, cuyas propiedades básicas se recogen en la siguiente tabla.

Tabla 3-12. *Propiedades del betún 50/70*

Propiedad	Norma	Resultado
Penetración (25°C)	EN 1426	56 mm <sup>-1</sup>
Temperatura de reblandecimiento	EN 1427	52,3 °C

En cuanto a los aditivos utilizados con el objetivo de mejorar las características del betún contenido en el fresado, debido a que no se ha obtenido permiso para publicar ni su nombre ni detalles sobre su composición, esta tesis se limita únicamente a valorar el efecto que causan sobre las propiedades del betún y sobre el comportamiento de las mezclas bituminosas. Simplemente es posible decir que uno de ellos (en adelante aditivo A) es un aditivo comercial, considerado como un aditivo rejuvenecedor, mientras que el otro (en adelante aditivo B), es considerado como un aditivo fluidificante.

### 3.1.5. Tipo y composición de las mezclas bituminosas desarrolladas

El tipo de mezcla bituminosa seleccionada, de acuerdo con la nomenclatura establecida en el artículo 542 del PG-3, se corresponde con una mezcla bituminosa codificada de la siguiente manera:

AC16 surf 50/70 S

En concreto, esta mezcla se corresponde con un hormigón bituminoso con tamaño máximo de árido de 16 mm, granulometría de tipo semidensa y cuyo uso se limita a la capa de rodadura. El betún utilizado en este caso, como se ha visto, es un betún 50/70, cuya utilización en capa de rodadura está permitida para tráfico a partir de la categoría T2 en zonas clasificadas como zona térmica estival cálida, para tráfico a partir de T1 para zona térmica estival media y para cualquier tipo de tráfico en zona térmica estival templada.

La distribución granulométrica correspondiente a este tipo de mezcla viene definida en el PG-3 por medio del huso granulométrico, el cual marca los límites para cada abertura de los tamices. En particular, el huso granulométrico de esta mezcla es el que se muestra en la Figura 3-7. Respetando estos límites, el contenido de huecos deberá situarse en el rango del 4 al 6% para categorías de tráfico pesado de T00 a T2, y el rango del 3 al 6% para tráfico a partir de T3.

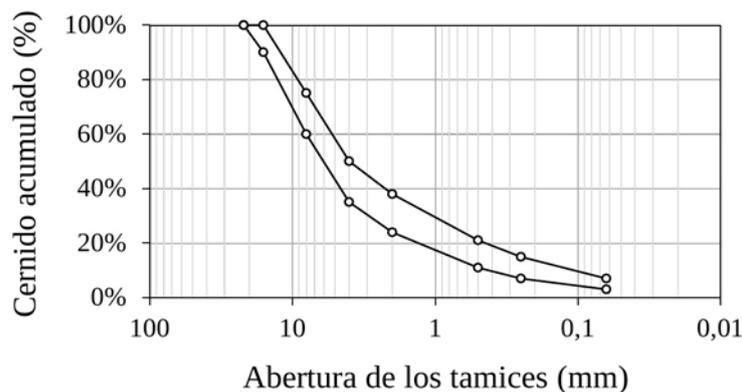


Figura 3-7. Huso granulométrico AC16 S

Por otro lado, también en el PG-3 se establece la relación ponderal recomendable entre polvo mineral y ligante bituminoso (relación entre el porcentaje de polvo mineral y el de ligante expresados ambos respecto de la masa total del árido seco, incluido el polvo mineral). Para este tipo de mezcla y para las categorías de tráfico desde T00 hasta T2 se establece un valor recomendable de 1,2 si se trata de una mezcla cuyo uso será dentro de una zona clasificada como zona térmica estival cálida o media, y de 1,1 para el resto de zonas.

Finalmente, atendiendo a las especificaciones recogidas en la Orden FOM/3460/2003, de 28 de noviembre, por la que se aprueba la norma 6.1 IC Secciones de firme, de la Instrucción de Carreteras, este tipo de mezclas pueden utilizarse en capa de rodadura siempre y cuando la IMDp sea la correspondiente a una categoría de tráfico pesado T2 o menor (<800 vehículos pesados/día). En cualquier aplicación el espesor de esta capa será de 5 cm, tal y como se indica en el PG-3.

#### 3.1.5.1. Composición de los áridos de la mezcla bituminosa de referencia.

Para la fabricación de esta mezcla se han utilizado dos tipologías distintas de árido: árido calizo y árido ofítico. En la Figura 3-8 se muestra la composición de los áridos de esta mezcla, especificando para cada fracción el tipo de árido utilizado. Destacar que los porcentajes hacen referencia a la proporción en volumen de cada componente, de forma que, una vez se induzcan los materiales alternativos, algunos de ellos con densidades considerablemente superiores, sea posible comparar entre mezclas.

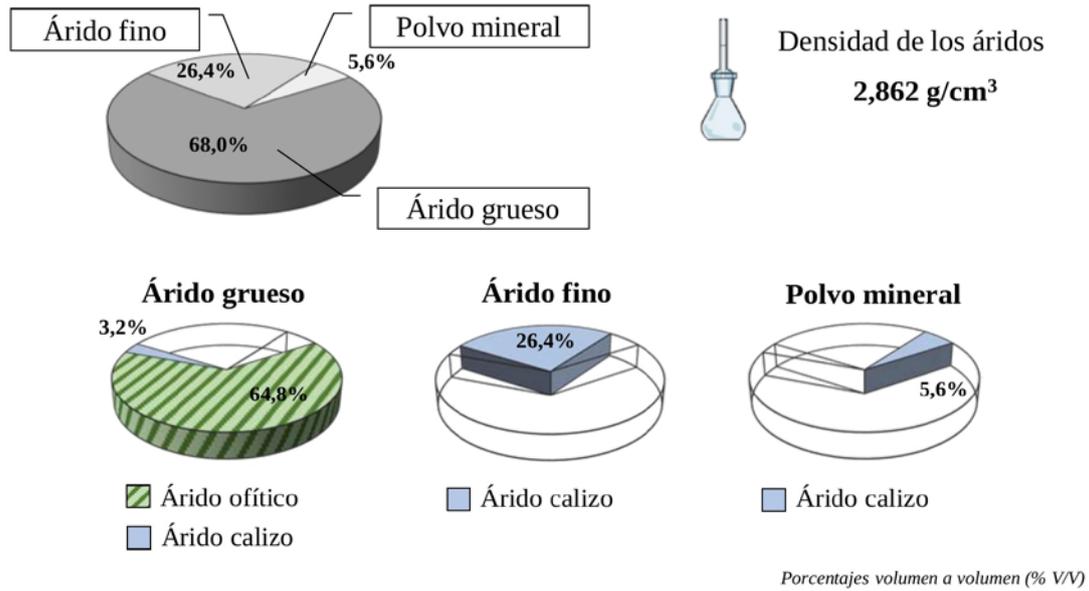


Figura 3-8. Composición volumétrica de los áridos de la mezcla de referencia

Esta composición de áridos resulta en la granulometría que se muestra en la Figura 3-9, en la cual también se han incluido los límites que establece el PG-3 para este tipo de mezclas. En este caso, se muestra tanto el porcentaje de material que pasa por cada abertura de tamiz sobre el peso como sobre el volumen total de los áridos. Debido a que no hay grandes diferencias entre las densidades de los áridos, apenas hay diferencias entre la curva granulométrica expresada como porcentaje sobre el peso y la expresada como porcentaje sobre el volumen. La granulometría en volumen ha sido utilizada como referencia para realizar el ajuste de las mezclas experimentales.

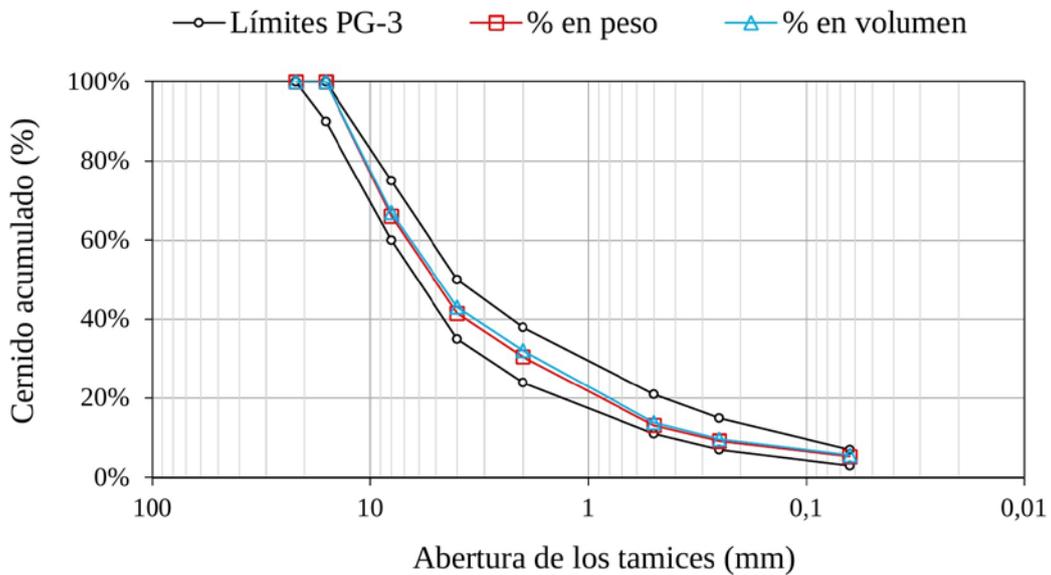


Figura 3-9. Granulometría de la mezcla de referencia

3.1.5.2. Composición de los áridos de las mezclas bituminosas experimentales.

Vista la mezcla de referencia, a continuación en la Tabla 3-13 se muestra la composición de los áridos para cada una de las 11 mezclas experimentales desarrolladas. En total se cuenta con seis dosificaciones distintas, cinco de las cuales incorporan fresado en su composición. Estas cinco dosificaciones con fresado resultan en un total de 10 mezclas ya que, cada una de ellas se ha estudiado utilizando ambos aditivos alternativamente.

Tabla 3-13. Composición de los áridos de las mezclas experimentales (% v/v)

Mezcla	ID	Aditivo	Escoria negra	Escoria LD	Fresado	Arena de moldeo	Árido calizo																																										
Mezcla 1	1A	A	43,2%	-	40,2%	14,4%	2,2%																																										
	1B	B						Mezcla 2	2A	A	53,1%	-	25,3%	18,1%	3,5%	2B	B	Mezcla 3	3A	A	-	43,1%	40,3%	14,4%	2,2%	3B	B	Mezcla 4	4A	A	42,8%	-	40,0%	-	17,2%	4B	B	Mezcla 5	5A	A	52,6%	-	25,0%	-	22,4%	5B	B	Mezcla 6	6
Mezcla 2	2A	A	53,1%	-	25,3%	18,1%	3,5%																																										
	2B	B						Mezcla 3	3A	A	-	43,1%	40,3%	14,4%	2,2%	3B	B	Mezcla 4	4A	A	42,8%	-	40,0%	-	17,2%	4B	B	Mezcla 5	5A	A	52,6%	-	25,0%	-	22,4%	5B	B	Mezcla 6	6	-	70,0%	-	-	24,4%	5,6%				
Mezcla 3	3A	A	-	43,1%	40,3%	14,4%	2,2%																																										
	3B	B						Mezcla 4	4A	A	42,8%	-	40,0%	-	17,2%	4B	B	Mezcla 5	5A	A	52,6%	-	25,0%	-	22,4%	5B	B	Mezcla 6	6	-	70,0%	-	-	24,4%	5,6%														
Mezcla 4	4A	A	42,8%	-	40,0%	-	17,2%																																										
	4B	B						Mezcla 5	5A	A	52,6%	-	25,0%	-	22,4%	5B	B	Mezcla 6	6	-	70,0%	-	-	24,4%	5,6%																								
Mezcla 5	5A	A	52,6%	-	25,0%	-	22,4%																																										
	5B	B						Mezcla 6	6	-	70,0%	-	-	24,4%	5,6%																																		
Mezcla 6	6	-	70,0%	-	-	24,4%	5,6%																																										

Como puede verse en la Tabla 3-14, la granulometría de todas las mezclas experimentales, expresada en porcentaje en volumen, es prácticamente idéntica a la granulometría de la mezcla de referencia.

Tabla 3-14. Granulometría de las mezclas bituminosas. Cernido acumulado (% v/v)

Mezcla	Abertura de tamiz (mm)							
	22	16	8	4	2	0,5	0,25	0,063
Referencia	100,0	100,0	67,0	43,0	32,0	14,2	9,9	5,6
Mezcla 1	99,3	96,3	67,1	41,8	30,3	15,6	10,7	5,6
Mezcla 2	99,6	97,7	67,2	41,8	30,2	15,5	10,6	5,6
Mezcla 3	99,3	96,3	67,4	42,3	30,8	15,8	10,8	5,6
Mezcla 4	99,3	96,3	67,4	42,3	30,8	15,8	10,8	5,6
Mezcla 5	99,6	97,7	67,5	42,4	30,9	15,8	10,7	5,6
Mezcla 6	100,0	100,0	67,1	41,8	30,1	15,7	10,9	5,6

A continuación, se muestra con más detalle la composición de cada una de las dosificaciones experimentales.

### Mezcla 1

Esta dosificación está compuesta por subproductos industriales y por fresado de forma que estos sustituyen el 97,8% del volumen de los áridos convencionales. El contenido de fresado supone en este caso un 40,2% del volumen de los áridos.

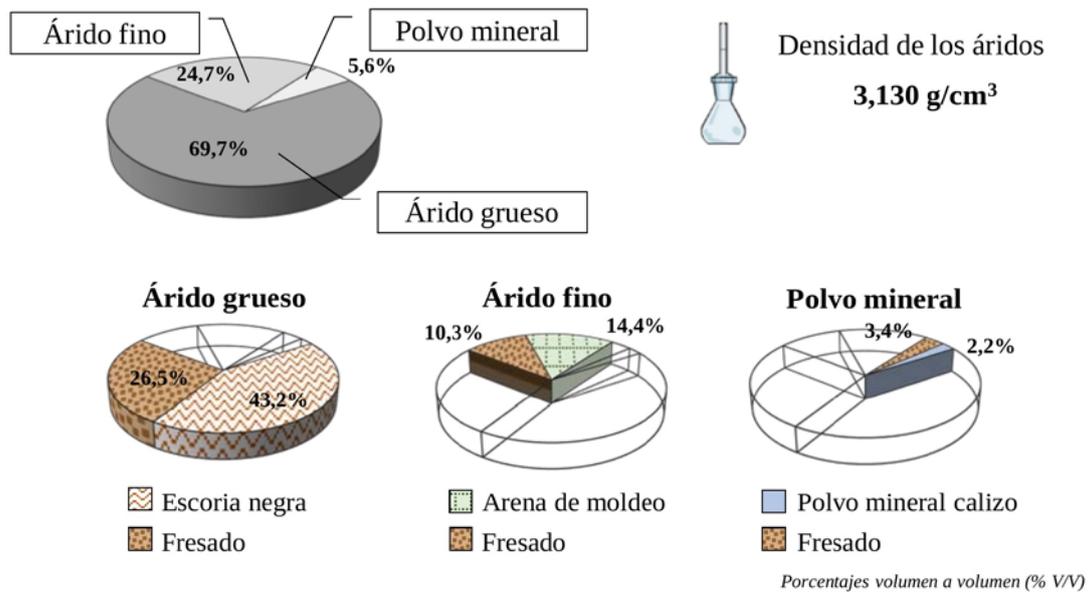


Figura 3-10. Composición volumétrica de los áridos de la mezcla 1

### Mezcla 2

Esta dosificación incorpora los mismos materiales que la mezcla 1 pero en distintas proporciones, sustituyendo el 96,5% del volumen de los áridos convencionales, con un contenido de fresado del 25,3% del volumen de los áridos de la mezcla.

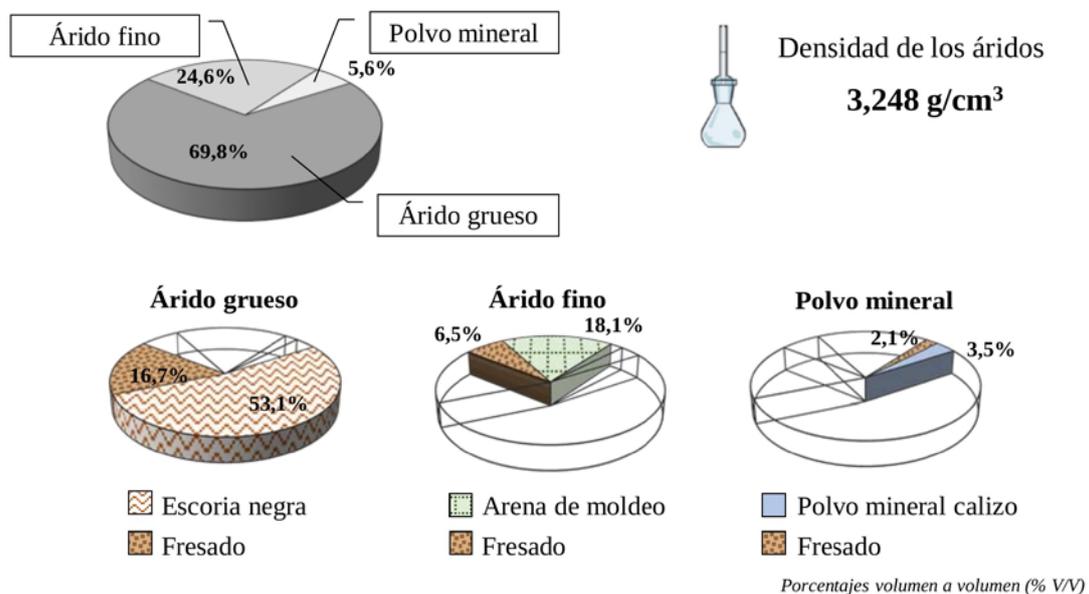


Figura 3-11. Composición volumétrica de los áridos de la mezcla 2

**Mezcla 3**

Esta dosificación es la única que incorpora escoria LD, en este caso, en la fracción gruesa del árido. Los materiales alternativos ocupan en este caso un 97,8% del volumen de áridos, con un contenido de fresado del 40,3%.

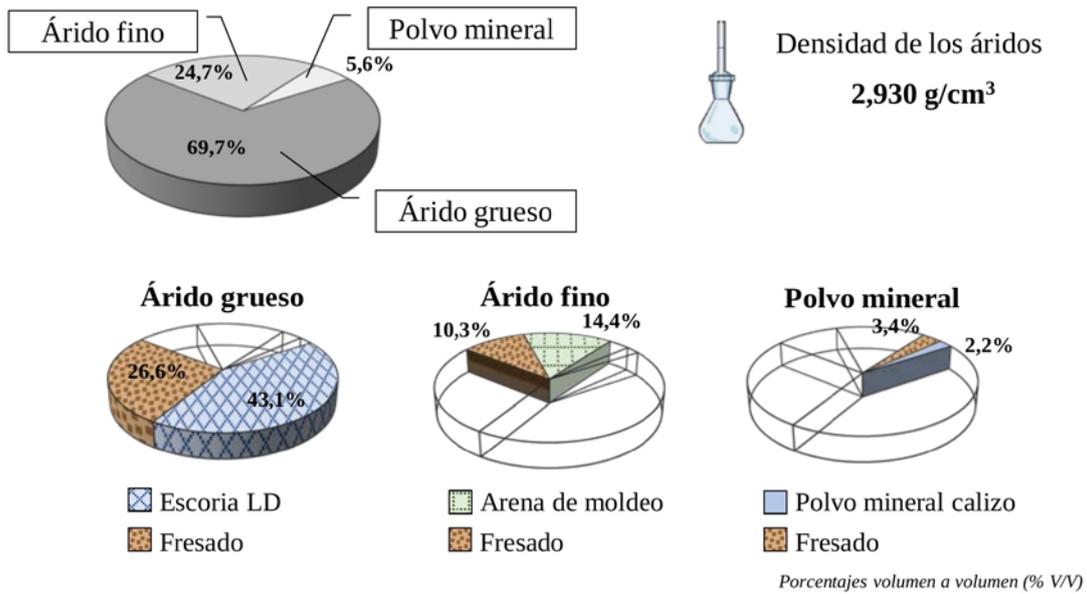


Figura 3-12. Composición volumétrica de los áridos de la mezcla 3

**Mezcla 4**

En esta dosificación la fracción fina del árido se completa con árido calizo, no utilizando en este caso arena de moldeo. De esta forma, se obtiene una mezcla con un 82,8% del volumen compuesto por áridos alternativos, formados por un 42,8% de escoria negra y un 40% de fresado.

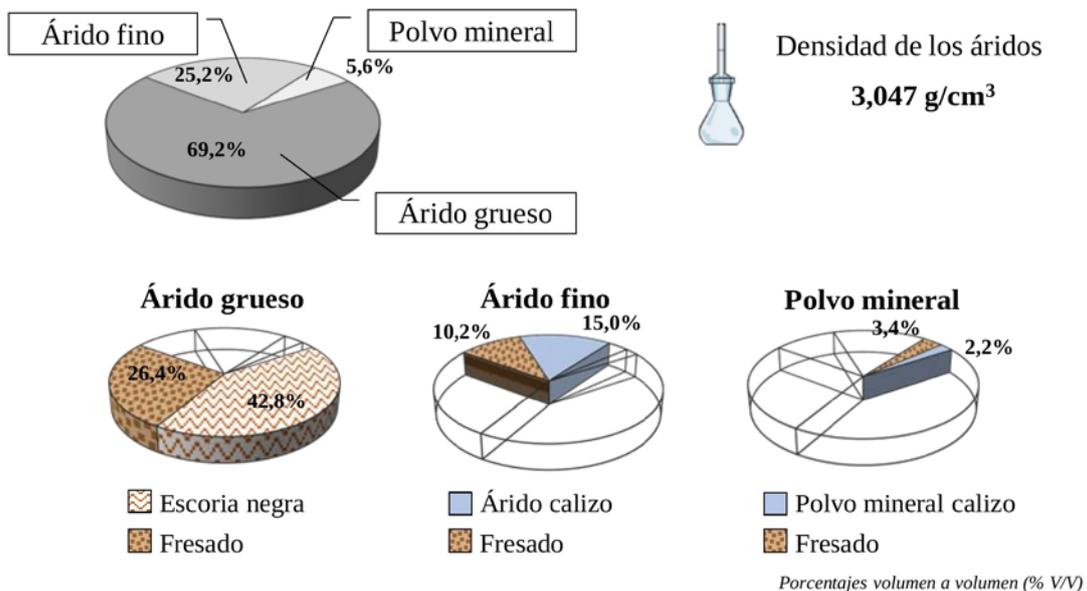


Figura 3-13. Composición volumétrica de los áridos de la mezcla 4

### Mezcla 5

Esta dosificación mantiene una composición similar a la anterior pero reduciendo el contenido de fresado hasta un 25,0% del volumen total de los áridos. El resultado es una mezcla con un 77,6% del volumen de áridos compuesto por materiales alternativos.

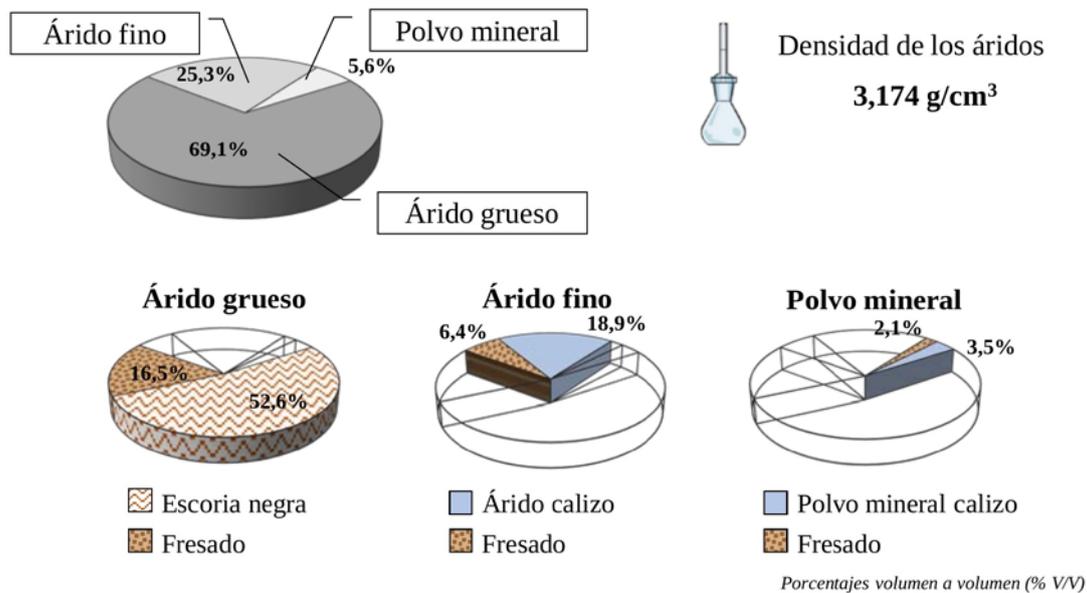


Figura 3-14. Composición volumétrica de los áridos de la mezcla 5

### Mezcla 6

Siendo la única dosificación experimental que no utiliza fresado, se trata de una mezcla que incorpora escoria negra en la fracción gruesa del árido y arena de moldeo en la fracción fina, sumando entre ambas un 94,4% del volumen de los áridos. Esta dosificación incorpora árido convencional únicamente en la fracción del polvo mineral.

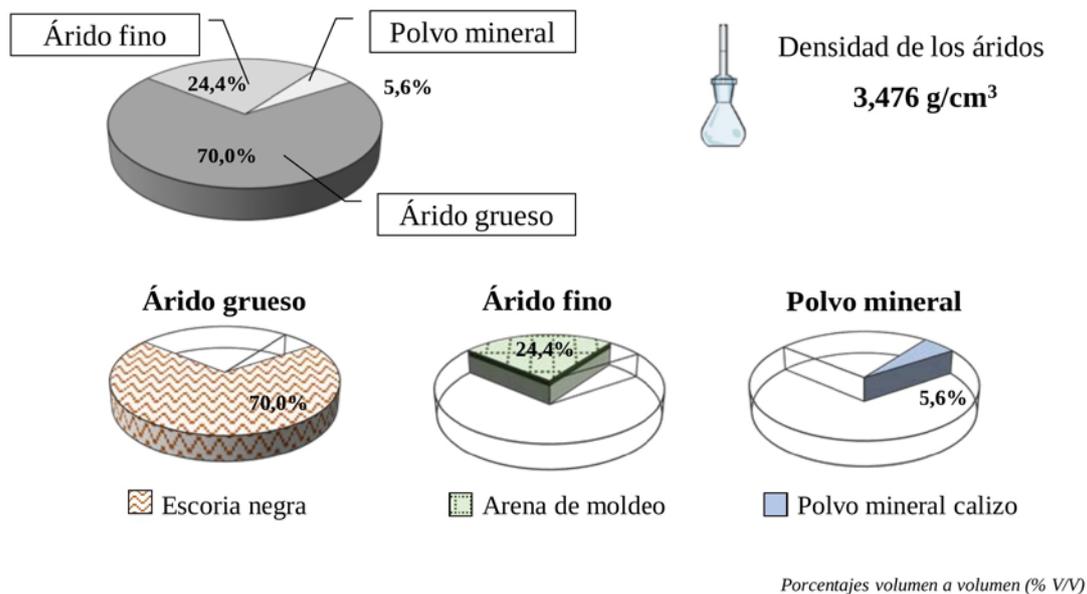


Figura 3-15. Composición volumétrica de los áridos de la mezcla 6

### 3.1.6. Metodología de fabricación de las mezclas bituminosas en laboratorio

Para la preparación de las diferentes muestras se ha seguido un protocolo diferente en función de si la mezcla incorpora o no fresado en su composición. De forma general es posible diferenciar entre tres fases dentro de este procedimiento: preparación de los materiales, mezclado y compactación.

De esta forma, para las mezclas sin fresado (mezcla 6 y mezcla de referencia), el procedimiento comienza con el calentamiento de los áridos, incluido el polvo mineral, situando los mismos en estufa durante un mínimo de 4 horas a 170°C de temperatura (superior a la temperatura de mezcla para compensar las pérdidas sufridas durante la posterior manipulación de los áridos). Posteriormente, se procede con el calentamiento del betún, el cual también se sitúa en estufa a 150°C durante el tiempo mínimo imprescindible para que alcance la temperatura requerida, en este caso, durante 2 horas, hasta alcanzar el equilibrio.

Una vez que todos los materiales han alcanzado la temperatura, se procede con el mezclado de los mismos. Primero, se incorporan los áridos al mezclador, exceptuando el polvo mineral de aportación. Posteriormente se añade el betún y se procede con el mezclado durante 1 minuto. Pasado este tiempo, se incorpora a la mezcla el polvo mineral de aportación, y se continúa con el mezclado durante otros 4 minutos más. Una vez finalizado el mezclado, la muestra es extraída del mezclador e inmediatamente puesta en estufa a la temperatura de compactación, que en este caso se ha fijado en 140°C. A partir de aquí, dependiendo del ensayo, se seguirá el procedimiento de compactación que sea necesario.

En el caso de las mezclas con fresado, este procedimiento cambia ligeramente. En primer lugar, el fresado no es calentado junto con el resto de áridos, sino que se calienta de forma independiente. En concreto, el fresado se calienta a 110°C, manteniéndolo en estufa solamente durante 1 hora. Para compensar la diferencia con la temperatura de mezcla, el resto de áridos se calientan a una temperatura superior a la habitual, en este caso a 185°C. El betún 50/70 se calienta a 150°C del mismo modo que para las mezclas sin fresado.

Una vez alcanzadas las temperaturas, se procede con el mezclado. En primer lugar se colocan los áridos en el mezclador, a excepción del fresado y el polvo mineral de aportación. Luego, sobre el fresado se pulveriza el aditivo y se incorpora junto con el resto de áridos al mezclador. Una vez incorporado, fresado y áridos se mezclan durante 30 segundos. Posteriormente se añade el betún y se comienza el mezclado, tras 1 minuto se agrega el polvo mineral de aportación y se finaliza el mezclado manteniéndolo durante otros 4 minutos más. La mezcla resultante se coloca en estufa a la temperatura de compactación (140°C) y se utiliza a conveniencia.

### 3.1.7. Análisis de la influencia de los aditivos utilizados en las propiedades del betún

Antes de comenzar con este apartado es necesario comentar que la selección tanto de los aditivos como de la cantidad a utilizar de los mismos, fijada en un 2,5% sobre el peso del betún aportado por el fresado, fue realizada por dos de las entidades participantes en el proyecto AlterPave.

Sin embargo, dada la alta tasa de fresado utilizado en las mezclas desarrolladas, así como la importancia de la utilización de aditivos, en esta tesis se ha incluido un estudio donde se evalúa la influencia de los aditivos utilizados (en la dosis establecida) en las propiedades reológicas del betún.

Para ello, mediante la utilización de un reómetro modelo DHR-I (TA Instruments), se han ejecutado tres ensayos diferentes, con el objetivo de evaluar la rigidez del betún, su comportamiento ante el fallo por formación permanente y su resistencia ante esfuerzos de fatiga. Estos ensayos, detallados más adelante, son:

- Determinación del módulo complejo y el ángulo de fase (AASHTO T 315)
- Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) test (AASHTO TP 70)
- Linear amplitude sweep (LAS) test (AASHTO TP 101)

Por tanto, a partir del betún extraído del fresado (en adelante, betún reciclado), se han preparado las muestras que se indican en la Tabla 3-15. En dicha tabla, se incluye también la nomenclatura utilizada para identificar a cada una de ellas.

Tabla 3-15. Composición de las muestras de betún ensayadas

Identificación	Composición de la muestra
50/70	100% Betún 50/70
RAP	100% Betún reciclado
RAP + A	100% Betún reciclado + Aditivo A
RAP + B	100% Betún reciclado + Aditivo B
Betún A	60% Betún 50/70 + 40% Betún reciclado + Aditivo A
Betún B	60% Betún 50/70 + 40% Betún reciclado + Aditivo B

En todos los casos, la cantidad de aditivo utilizada es del 2,5% del peso del betún reciclado

#### 3.1.7.1. Determinación del módulo complejo y el ángulo de fase (AASHTO T 315)

El objetivo fundamental perseguido con la ejecución de este ensayo es determinar la rigidez, a través de la determinación del módulo complejo ( $G^*$ ) y el ángulo de fase ( $\delta$ ) de las diferentes muestras de betún. De forma resumida, este ensayo consiste en someter a la muestra de betún a un esfuerzo oscilatorio sinusoidal a un nivel de deformación constante, registrando la deformación y tensión máximas y el desfase existente entre ambas.

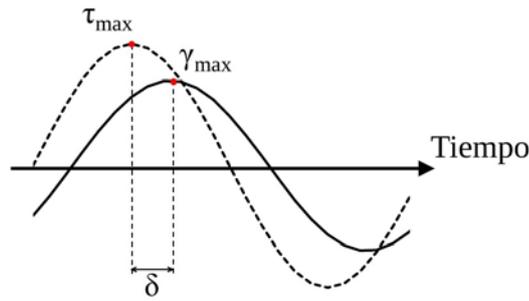


Figura 3-16. Esquema del ensayo de determinación del módulo complejo y el ángulo de fase en betunes (AASHTO T 315)

A partir de estos datos recogidos durante el ensayo se calculan el módulo complejo (ecuación 1) y el ángulo de fase.

$$G^* = \frac{\tau_{max}}{\gamma_{max}} \quad (3-1)$$

$G^*$  Módulo complejo (Pa)  
 $\tau_{max}$  Tensión máxima (Pa)  
 $\gamma_{max}$  Deformación máxima

Con el fin de poder determinar la curva maestra de módulos, este ensayo se ha ejecutado a distintas frecuencias de aplicación de la carga y a distintas temperaturas. En particular, las frecuencias utilizadas han sido: 30; 20; 10; 5; 3; 1,59; 1; 0,5; 0,3 y 0,1 Hz. Las temperaturas de ensayo utilizadas van desde los 5°C hasta los 75°C, en incrementos de 5°C. Con todos los resultados, se ha calculado la curva maestra utilizando las siguientes ecuaciones:

$$\log(G^*) = a + \frac{b}{1 + \exp(c + d \times \log(f_R))} \quad (3-2)$$

$f_R$  Frecuencia reducida (rad/s)  
 $a, b, c, d$  Constantes

$$f_R = a_T \times f \quad (3-3)$$

$f$  Frecuencia (rad/s)

$$\log(a_T) = a_1 \times T^2 + a_2 \times T + a_3 \quad (3-4)$$

$T$  Temperatura (°C)  
 $a_1, a_2, a_3$  Constantes

Para representar los valores del ángulo de fase se ha utilizado el diagrama de Black. Esta representación relaciona el valor de ángulo de fase (eje y) con el valor de módulo complejo (eje x). Esta representación, además de ser muy útil para detectar fácilmente errores en el ensayo, también permite identificar entre distintos tipos de betunes [135,136].

### 3.1.7.2. Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) test (AASHTO TP 70)

Este ensayo tiene por objeto evaluar el comportamiento de los betunes en términos de deformación permanente. En este ensayo, la muestra es sometida a un esfuerzo constante durante 1 segundo para posteriormente eliminar la carga durante 9 segundos. De esta forma, se realizan 10 ciclos de carga a 0,1 kPa y otros 10 a 3,2 kPa. La temperatura de ensayo en este caso se ha fijado en 60°C para todas las muestras. A partir de los resultados, para cada ciclo de carga se determina el porcentaje de recuperación (R) y el parámetro  $J_{nr}$ , utilizando para ello las ecuaciones mostradas a continuación.

$$R = \frac{\gamma_p - \gamma_n}{\gamma_p - \gamma_0} \quad (3-5)$$

$\gamma_p$	Deformación máxima
$\gamma_n$	Deformación no recuperada
$\gamma_0$	Deformación inicial

$$J_{nr} = \frac{\gamma_n - \gamma_0}{\tau} \quad (3-6)$$

$\tau$  Tensión (kPa)

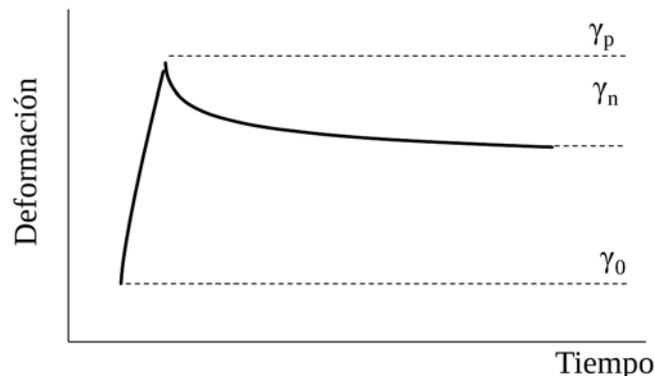


Figura 3-17. Esquema del ensayo MSCR (AASHTO TP 70)

### 3.1.7.3. Linear amplitude sweep (LAS) test (AASHTO TP 101)

Este ensayo tiene como finalidad evaluar el comportamiento a fatiga del betún. A partir de los resultados, se aplica el modelo VECD, de sus siglas en inglés, *Viscoelastic Continuum Damage model*. Estableciendo un criterio de fallo, es posible determinar el número de ciclos hasta el fallo ( $N_f$ ) para distintos niveles de deformación. En este caso, el criterio de fallo se ha establecido cómo el momento en el que el valor de  $G^* \times \text{seno}(\delta)$  se reduce en un 35% desde su valor inicial [110].

La ejecución de este ensayo, que en este caso se ha realizado a 25°C, se divide en dos etapas. En una primera etapa, se aplica un esfuerzo oscilatorio a una deformación constante del 0,1%, abarcando múltiples frecuencias que van desde los 0,1 Hz hasta los 30 Hz. Esta fase sirve para determinar las propiedades viscoelásticas y lineales del betún (módulo complejo y ángulo de fase).

Posteriormente, la muestra de betún es sometida a una deformación oscilatoria que va creciendo linealmente desde un valor del 0,1% hasta alcanzar un 30%, en un tiempo total de 5 minutos. A partir de los resultados obtenidos en ambas fases, se determinan los parámetros del modelo, siguiendo la metodología recogida en la norma.

### 3.1.8. Estudio de la mezcla y obtención de la fórmula de trabajo

La cantidad de betún a utilizar en cada una de las mezclas se ha determinado experimentalmente, optimizando la cantidad de betún hasta conseguir unas propiedades volumétricas adecuadas a las exigencias del PG-3. En este caso particular, se ha establecido el criterio de utilizar la misma cantidad de betún en las dos mezclas que configuran cada una de las composiciones, y, en la medida de lo posible, mantener una cantidad lo más parecida posible en todas las mezclas experimentales. Para ello, se acepta que puedan existir diferencias en las propiedades volumétricas de cada mezcla, siempre y cuando el resultado obtenido esté dentro de los límites normativos.

En este punto es necesario tener en cuenta que, en aquellas mezclas que incorporan fresado, el contenido total de ligante se determinará teniendo en cuenta tanto el betún 50/70 aportado a la mezcla como el betún procedente del propio fresado (Tabla 3-9), cuya cantidad vendrá fijada por el contenido de fresado utilizado en cada mezcla.

A continuación, se muestra la metodología seguida para determinar las propiedades volumétricas, así como para evaluar el comportamiento de las mezclas una vez obtenida la fórmula de trabajo definitiva. En concreto, se detalla la metodología seguida para ejecutar el ensayo de compactabilidad, el ensayo Marshall, el ensayo de sensibilidad al agua y el ensayo de rodadura.

### 3.1.8.1. Propiedades volumétricas

El contenido de huecos se ha determinado según el método de ensayo de la norma EN 12697-8, donde se indican las fórmulas necesarias para el cálculo del contenido de huecos de aire ( $V_m$ ), del contenido de huecos del árido mineral (VMA) y el porcentaje de huecos rellenos con ligante (VFB). El contenido de huecos de aire se calculará, con una aproximación del 0,1% (v/v), mediante la siguiente fórmula:

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \quad (3-7)$$

$V_m$	Contenido de huecos de aire en la mezcla (v/v)
$\rho_m$	Densidad máxima de la mezcla ( $\text{kg/m}^3$ )
$\rho_b$	Densidad aparente de la probeta ( $\text{kg/m}^3$ )

Para determinar la densidad máxima y aparente, necesarias para determinar el contenido de huecos, se ha seguido lo establecido en el Anexo B de la norma EN 13108-20. En dicho anexo se indica que, para mezclas con un contenido de huecos requerido en norma menor del 7%, la determinación de la densidad aparente se ha efectuar según el procedimiento B de la norma EN 12697-6, en condición de superficie saturada seca, y la determinación de la densidad máxima se debe hacer según el procedimiento A, en agua, de la norma EN 12697-5.

La determinación del contenido de huecos en cualquier tipo de mezclas con tamaño máximo de árido inferior o igual a veintidós milímetros se hará sobre probetas compactadas mediante compactador de impactos, de acuerdo con la norma EN 12697-30, aplicando en este caso 75 golpes por cara, tal y como se indica en el PG-3. Los resultados mostrados en esta tesis reflejan el valor medio calculado a partir de los resultados de al menos 3 probetas.

### 3.1.8.2. Evaluación de la energía de compactación

Para determinar la energía de compactación se ha utilizado el ensayo de compactabilidad (EN 12697-10) con una máquina giratoria Controls ICT 76-B0251. Para ello se emplearon moldes de 100 mm de diámetro, una presión de 600 KPa, una velocidad de rotación de 30 rpm y un ángulo de giro de  $0,82^\circ$ . De esta forma, utilizando el modelo desarrollado por del Río (2011) [137], se calcula la energía acumulada de compactación por unidad de peso  $W$  ( $\text{kJ/kg}$ ) a partir de los valores de altura y esfuerzo cortante registrados durante el ensayo (ecuación 8).

$$\frac{W}{m} = \sum_1^N \frac{W_i}{m} = \frac{2 \times \pi \times \theta \times A}{m} \sum_1^N h_i \times S_i \quad (3-8)$$

$W$	Energía acumulada de compactación por unidad de peso (kJ/kp)
$m$	Masa de la probeta (kg)
$\theta$	Ángulo de inclinación de la probeta (rad)
$A$	Área de la probeta (m <sup>2</sup> )
$h_i$	Altura de la probeta en el ciclo $i$ (m)
$S_i$	Esfuerzo cortante medio en el ciclo $i$ (kN/m <sup>2</sup> )
$N$	Número de ciclos ejecutados

### 3.1.8.3. Ensayo Marshall

Con este ensayo se consigue determinar los valores de estabilidad, deformación y cociente Marshall. Pese a que el PG-3 no establece ningún requisito relativo a estos valores, se ha considerado apropiado ejecutar dicho ensayo ya que ha sido tradicionalmente un buen indicador del comportamiento mecánico de la mezcla. A modo de referencia, es posible utilizar los requisitos exigidos por el PG-3 en su versión de 2004 (Orden FOM/891/2004, de 1 de marzo), los cuales se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 3-16. Requisitos para el ensayo Marshall (PG-3. Orden FOM/891/2004)

Parámetro	Categoría de tráfico pesado			
	T00 y T0	T1 y T2	T3 y arcenes	T4
Estabilidad (kN)	> 15	> 12,5	> 10	8 – 12
Deformación (mm)	2 – 3	2 – 3,5		2,5 – 3,5

Para la ejecución del ensayo, utilizando las probetas preparadas para la determinación del contenido de huecos (mínimo 3 probetas), se ejecuta el ensayo conforme a lo establecido en la norma EN 12697-34. En este caso, las probetas se sumergieron durante 60 minutos en el baño de agua a 60°C, para posteriormente ensayar la probeta aplicando la carga tal y como se especifica en dicha norma.

### 3.1.8.4. Sensibilidad al agua

Tal y como se recoge en el artículo 542 del PG-3, se comprobará la adhesividad árido-ligante mediante la caracterización de la acción del agua. Para ello, la resistencia conservada (ITSR) en el ensayo de tracción indirecta tras inmersión, realizado a 15°C (norma EN 12697-12), tendrá un valor mínimo del 85% para capas de rodadura.

Para la ejecución de este ensayo, se preparan un mínimo de 6 probetas cilíndricas de las mismas dimensiones a las preparadas para el ensayo Marshall (habitualmente se han utilizado 8 probetas). Para ello, al tratarse de mezclas de tamaño máximo no mayor de 22 milímetros, estas probetas deben prepararse según la norma EN 12697-30 con 50 golpes por cara.

Estas probetas se dividen en dos grupos de forma que a cada uno se le aplica un acondicionamiento diferente. A grosso modo, las probetas de uno de los grupos (probetas húmedas) permanecen sumergidas en agua a 40°C durante un periodo de tiempo, mientras que las probetas del otro grupo (probetas secas) permanecen secas a una temperatura intermedia (25°C). La relación entre la resistencia a tracción indirecta de cada uno de los grupos da como resultado el valor de resistencia conservada.

### 3.1.8.5. Resistencia a la deformación permanente

En este caso, según se indica en el artículo 542 del PG-3, la resistencia a deformaciones permanentes se determinará mediante el ensayo de pista de laboratorio, siguiendo el procedimiento B en aire recogido en la norma EN 12697-22, empleando el dispositivo pequeño, a una temperatura de 60°C y con una duración de 10.000 ciclos. Como resultado del ensayo se obtienen los siguientes valores:

- Pendiente de deformación en pista ( $WTS_{AIRE}$ ).

$$WTS_{AIRE} = \frac{d_{10.000} - d_{5.000}}{5} \quad (3-9)$$

$WTS_{AIRE}$	Inclinación de la rodada (mm/10 <sup>3</sup> ciclos de carga)
$d_{10.000}$	Profundidad de la rodera después de 10.000 ciclos de carga (mm)
$d_{5.000}$	Profundidad de la rodera después de 5.000 ciclos de carga (mm)

- Profundidad media de la rodera después de 10.000 ciclos de carga ( $RD_{AIRE}$ ).
- Porcentaje de la profundidad media de la rodera ( $PRD_{AIRE}$ ).

$$PRD_{AIRE} = \frac{d_{10.000} - d_{5.000}}{e} \quad (3-10)$$

$PRD_{AIRE}$	Profundidad media de la rodera (mm)
$d_{10.000}$	Profundidad de la rodera después de 10.000 ciclos de carga (mm)
$d_{5.000}$	Profundidad de la rodera después de 5.000 ciclos de carga (mm)
$e$	Espesor de la probeta (mm)

Para capas de rodadura, las restricciones establecidas por el artículo 542 del PG-3 son las recogidas en la siguiente tabla.

Tabla 3-17. Límites establecidos por el PG-3 para el valor de la pendiente media de deformación ( $WTS_{AIRE}$ ) en el intervalo de 5.000 a 10.000 ciclos

Zona térmica estival	Categoría de tráfico pesado			
	T00 y T0	T1	T2	T3 y arcenes
Cálida	$\leq 0,07$	$\leq 0,07$	$\leq 0,07^1$	$\leq 0,10^2$
Media	$\leq 0,07$	$\leq 0,07^2$	$\leq 0,10^2$	$\leq 0,15$
Templada	$\leq 0,10$	$\leq 0,10^2$	$\leq 0,10^2$	-

<sup>1</sup> Podrá aceptarse valores superiores si, simultáneamente, se cumple en el intervalo de 5.000 a 10.000 ciclos que  $WTS_{AIRE} \leq 0,10$  y  $PRD_{AIRE} < 5\%$ .

<sup>2</sup> Podrá aceptarse valores superiores si, simultáneamente, se cumple en el intervalo de 5.000 a 10.000 ciclos que  $WTS_{AIRE} \leq 0,15$  y  $PRD_{AIRE} < 5\%$ .

Para la realización de este ensayo, se utilizaron 2 probetas por tipo de mezcla con unas dimensiones de 410 mm de largo, 260 mm de ancho y 50 mm de espesor, compactadas mediante compactador de placa con el dispositivo de rodillo de acero (norma EN 12697-33). En todos los casos se ha comprobado que la densidad de dichas probetas alcanza una densidad superior al 98% de la obtenida en las probetas cilíndricas preparadas para la determinación del contenido de huecos.

### 3.1.9. Evaluación del comportamiento de la mezcla ante sollicitaciones dinámicas

En base a los resultados obtenidos en los ensayos anteriores, se realiza una selección de los dos pares de mezclas con mayor interés, teniendo en cuenta su comportamiento mecánico y el interés derivado de su composición y características. Para realizar la selección así como para determinar la rigidez y el comportamiento a fatiga de las mezclas bituminosas se ha seguido la metodología que se describe a continuación.

#### 3.1.9.1. Metodología de selección de 4 mezclas para evaluar su comportamiento dinámico

En primer lugar, las mezclas se han ordenado de mayor a menor puntuación de acuerdo con un valor numérico asociado a sus características y a los resultados obtenidos en los ensayos previamente realizados. En este caso, los resultados utilizados para asignar las puntuaciones y realizar esta clasificación han sido las siguientes:

- Pendiente de deformación en el ensayo de rodadura
- Resistencia conservada (ITSR) en el ensayo de sensibilidad al agua
- Contenido de ligante de aportación

Al resultado obtenido para cada uno de estos parámetros se le ha asignado una puntuación numérica que toma valores entre 0 y 1, de forma que cuanto mejor es el resultado en el ensayo, mayor es la puntuación. De esta forma, para el ensayo de rodadura se ha asignado una puntuación de 1 para un resultado de  $WTS_{AIRE}$  teórico de  $0,00 \text{ mm}/10^3 \text{ ciclos}$ , y una puntuación de 0 para un resultado en ese mismo parámetro de  $0,10 \text{ mm}/10^3 \text{ ciclos}$  o superior.

Por su parte, en el ensayo de sensibilidad al agua se asigna una puntuación de 0 a resultados de resistencia conservada inferiores al 85%. Esta puntuación aumenta linealmente hasta tomar un valor de 1 cuando el valor de resistencia conservada se corresponde con un valor teórico del 100%. Por último, al contenido de ligante de aportación se le asocia una puntuación de 1 cuando éste toma valores por debajo del 5% del volumen de la mezcla, reduciéndose hasta un valor de 0 esa puntuación cuando ese porcentaje supera el 15%.

De esta forma, aplicando una distribución lineal entre los valores máximo y mínimo indicados, se obtienen las ecuaciones que determinarán la distribución de puntuaciones, las cuales se muestran en la Tabla 3-18.

Tabla 3-18. Criterios de asignación de puntuaciones para las mezclas desarrolladas

Característica	Parámetro	Ecuación
Ensayo de rodadura	$WTS_{AIRE}$ ( $\text{mm}/10^3 \text{ ciclos}$ )	$P_1 = 1 - 10 \times WTS_{AIRE}$
Sensibilidad al agua	ITSR (%)	$P_2 = -5,7 + 0,067 \times ITSR$
Betún de aportación	Contenido de betún 50/70 (% v/v)	$P_3 = 1,5 - 0,102 \times B_{ap}$
$P_1$	Puntuación asociada a la pendiente de deformación $WTS_{AIRE}$	
$P_2$	Puntuación asociada a la resistencia conservada ITSR	
$P_3$	Puntuación asociada al contenido de ligante de aportación	
$B_{ap}$	Contenido de betún de aportación (%v/v)	

Una vez calculadas las puntuaciones de todas las mezclas, se calcula una media ponderada de dichas puntuaciones, para resultar en una única puntuación que permita comparar entre mezclas de una forma más sencilla. Para el cálculo de la media se ha dado distinto peso a cada uno de los parámetros, de forma que la puntuación total se ha calculado de acuerdo con la siguiente fórmula.

$$P_{TOTAL} = P_1 \times 0,4 + P_2 \times 0,4 + P_3 \times 0,2 \quad (3-11)$$

Analizando la ecuación se ve que se le ha dado más peso al resultado de los ensayos, donde cada uno supone el 40% de la puntuación total. El contenido de ligante, por tanto, supone el restante 20% de la puntuación.

La puntuación total obtenida de aplicar las ecuaciones supondrá la base para la selección, pero en ningún caso será el factor de decisión definitivo ya que, en última instancia, la selección podrá hacerse teniendo en cuenta otros intereses del proyecto, y especialmente, los intereses derivados de la composición de las mezclas.

Efectuada la selección, las cuatro mezclas seleccionadas junto con la mezcla de referencia se han caracterizado a través de ensayos dinámicos, determinando su rigidez y su comportamiento a fatiga, siguiendo la metodología descrita a continuación.

### *3.1.9.2. Rigidez*

La rigidez de las mezclas bituminosas se ha determinado utilizando el ensayo de flexión en cuatro puntos recogido en el Anexo B de la norma EN 12697-26. En este ensayo, una probeta prismática ( $460 \times 60 \times 60 \text{ mm}^3$ ) se somete a flexión periódica en cuatro puntos, con rotación y traslación (horizontal) libres en todos los puntos de carga y de reacción a la carga.

En este caso, se han preparado 4 probetas para cada condición de ensayo, las cuales se han obtenido mediante corte con sierra mecánica de probetas de 410 mm de largo, 260 mm de ancho y 80 mm de espesor, compactadas mediante compactador de placa con el dispositivo de rodillo de acero (norma EN 12697-33). Se ha comprobado que la densidad de dichas probetas alcanza una el 98% de la densidad obtenida en las probetas cilíndricas preparadas para la determinación del contenido de huecos.

Durante el ensayo se mide la fuerza necesaria para la deformación de la probeta en función del tiempo, así como el desfase entre la señal de fuerza y la señal de desplazamiento. Partiendo de esto, se calcula el módulo de rigidez y el ángulo de fase de la mezcla sometida a ensayo. En particular, este ensayo se ha realizado a 20°C de temperatura, aplicando una deformación constante de 50  $\mu\text{m/m}$  en un rango de frecuencias comprendido entre 0,1 Hz y 30 Hz. Este ensayo ha sido ejecutado utilizando una máquina hidráulica de ensayo universal Zwick Z100.

### *3.1.9.3. Resistencia a la fatiga*

La resistencia a fatiga de las mezclas bituminosas se ha determinado mediante el ensayo de flexión en cuatro puntos sobre probetas prismáticas, recogido en el Anexo D de la norma EN 12697-24. Con el mismo tipo de probetas, el mismo equipo y el mismo principio de aplicación de cargas que en el ensayo de rigidez, las probetas son sometidas a una carga sinusoidal, creando una deformación constante entre las mordazas interiores. Durante el ensayo, se mide, en función del tiempo, la carga necesaria para la flexión de la probeta, la deflexión y el desfase entre estas dos señales.

Este ensayo se ha realizado a 20°C de temperatura y con una frecuencia de carga de 30 Hz. Para determinar la ley de fatiga, se repite el ensayo para diferentes deformaciones de forma que, para cada una de ellas, se determine el número de ciclos que produce la rotura, tratando de abarcar un rango de ciclos de rotura entre 10.000 y 1 millón. En este caso se han utilizado un mínimo de 12 probetas para la ejecución de este ensayo. Para determinar el momento en que se produce la rotura se establecido como criterio de fallo la reducción de la rigidez de la probeta a la mitad de su valor inicial. La línea de fatiga se representa ajustando los resultados obtenidos a la siguiente ecuación.

$$\ln(N_f) = A_0 + A_1 \times \ln(\varepsilon) \quad (3-12)$$

$N_f$	Número de ciclos que producen la rotura
$\varepsilon$	Amplitud de la deformación inicial medida en el ciclo de carga número 100
$A_0, A_1$	Constantes

### 3.1.10. Estudio de la reciclabilidad de las mezclas desarrolladas

En este apartado se muestra la metodología seguida para evaluar la reciclabilidad de las mezclas desarrolladas. En particular, para realizar este estudio se ha seleccionado la mezcla 1 en sus dos versiones: 1A y 1B. Esta mezcla, que se corresponde con una de las seleccionadas para evaluar su rigidez y su resistencia a fatiga, despierta especial interés al ser una de las mezclas con mayor contenido de fresado y que incorpora materiales alternativos en un 97,8% del volumen de los áridos.

El primer paso para evaluar la reciclabilidad de las mezclas ha sido someter a estas a envejecimiento. En este caso, la mezcla ha sido sometida a un proceso acelerado compuesto por dos fases. La primera fase se trata del envejecimiento a corto plazo, el cual representa el sufrido por la mezcla durante las fases de fabricación y puesta en obra. Para simular esta fase, la mezcla se mantiene en estufa a 135°C durante 4 horas, antes de ser compactada. Este método es conocido como el método *Short-Term Oven Aging (STOA)* [138].

Una vez superada la prime fase, se preparan las probetas que sean necesarias de acuerdo al ensayo que se vaya a ejecutar. En este caso, dado que no va a ejecutarse ningún ensayo tras el envejecimiento a largo plazo, se prepararon probetas con las características descritas en la [Sección 3.1.8.5](#) para el ensayo de rodadura. Estas probetas son entonces sometidas a la segunda fase de envejecimiento, simulando el envejecimiento a largo plazo.

El método seleccionado para esta segunda fase es conocido como *Long-Term Oven Aging (LTOA)* y consiste en mantener las probetas en estufa a 85°C durante 120 horas. Algunos estudios apuntan a que con esta segunda fase es posible representar el envejecimiento sufrido durante unos 15 años en servicio en un clima húmedo no gélido, y el sufrido durante unos 7 años en un clima seco y gélido [138].

Una vez envejecidas, las probetas son desmenuzadas de tal modo que el resultado obtenido puede asemejarse a un fresado. Sobre este fresado generado en laboratorio se ha evaluado la influencia del envejecimiento artificial a través del análisis de las propiedades fundamentales del betún. En particular, se ha determinado el valor de penetración (EN 1426) y la temperatura de reblandecimiento (EN 1427) del betún contenido en cada una de las mezclas envejecidas, antes de ser sometidas al envejecimiento a corto plazo y después del envejecimiento a largo plazo. En este punto, en base a los resultados anteriores y la experiencia adquirida con el uso de los aditivos en fases previas, se valorará la conveniencia o no de cambiar la dosis de aditivo utilizada originalmente (2,5% sobre el peso del betún del fresado).

El siguiente paso es ajustar la dosificación de las mezclas utilizando el fresado artificial. Para ello, basado en la composición original de la mezcla 1, se ajusta la nueva dosificación, la cual queda detallada en la Figura 3-18. Se ha tratado que esta composición sea lo más similar posible a la composición original de la mezcla 1, manteniendo la misma distribución granulométrica. Las pequeñas variaciones existentes se deben a las diferencias que existen entre la granulometría del fresado original y la del fresado artificial preparado en laboratorio.

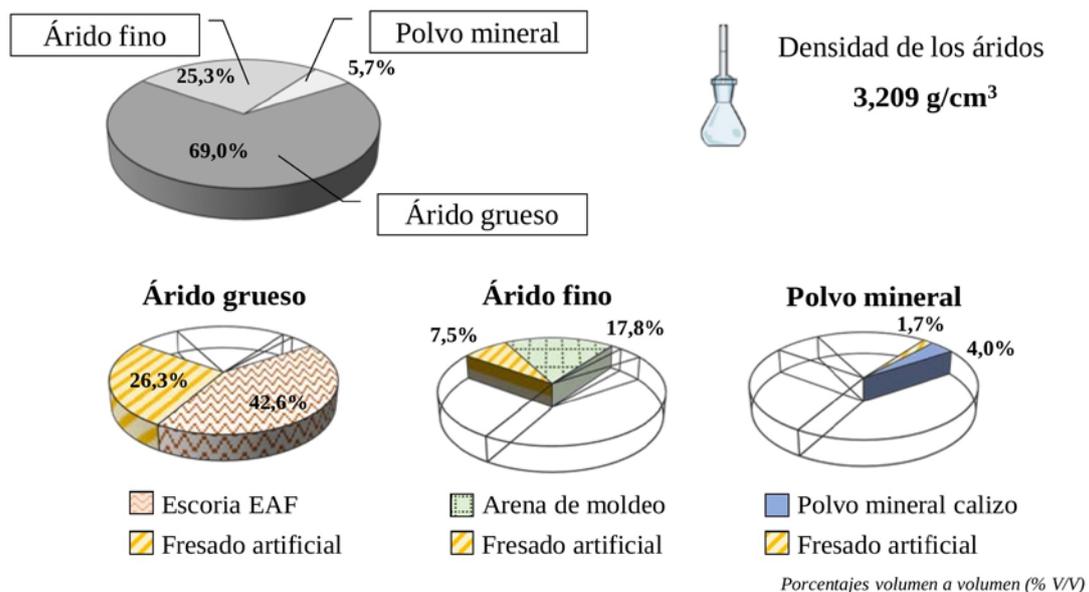


Figura 3-18. Composición volumétrica de los áridos de la mezcla utilizada en el estudio de reciclabilidad

Utilizando esta misma dosificación, se diseñan las dos mezclas que componen este estudio. En este caso, es necesario resaltar que existen dos diferencias entre ambas mezclas. Por un lado, una mezcla utiliza como fresado el generado artificialmente a partir de la mezcla 1A y utiliza el aditivo A (en adelante, mezcla 1Ar), mientras que la otra mezcla, por su parte, utiliza como fresado el generado a partir de la mezcla 1B e incorpora el aditivo B (en adelante, mezcla 1Br).

El comportamiento mecánico de ambas mezclas ha sido evaluado en laboratorio siguiendo la misma metodología descrita anteriormente para las mezclas originales. Como criterio de diseño se ha establecido que, siempre y cuando las propiedades volumétricas sean adecuadas, se utilizará el mismo contenido de ligante en ambas mezclas. Los ensayos ejecutados son los indicados a continuación, ejecutados todos ellos con las mismas particularidades descritas en secciones anteriores:

- Propiedades volumétricas (EN 12697-8)
- Ensayo Marshall (EN 12697-34)
- Resistencia a la deformación permanente (EN 12967-22)
- Sensibilidad al agua (EN 12697-12)
- Rigidez (EN 12697-26)
- Resistencia a la fatiga (EN 12697-24)

### **3.2. ESTUDIO DE MEZCLAS BITUMINOSAS MODIFICADAS POR VÍA SECA CON POLVO DE NEUMÁTICOS AL FINAL DE SU VIDA ÚTIL (NFU)**

En esta sección se detallan los materiales utilizados y la metodología seguida para evaluar el efecto de incorporar polvo de NFU en mezclas bituminosas por vía seca. En este caso, el tipo de mezcla, los materiales y la fórmula de trabajo han sido definidos previamente por una de las empresas constructoras participantes en el proyecto, en base a su experiencia y a sus intereses particulares. Este estudio, por tanto, se centra en los aspectos relacionados con la incorporación del polvo de neumático, obviando todo el trabajo previo de diseño de la mezcla bituminosa. En particular, en este estudio se recoge la investigación llevada a cabo para evaluar la influencia del tiempo de acondicionamiento en las propiedades finales de la mezcla bituminosa y la posterior evaluación del envejecimiento y reciclabilidad de dicha mezcla.

#### **3.2.1. Polvo de neumáticos al final de su vida útil (NFU)**

Para la realización de este estudio se han utilizado dos tipos diferentes de polvo de NFU. Debido a la existencia de un acuerdo de confidencialidad suscrito con la empresa proveedora, no es posible recoger en este documento una descripción exhaustiva de estos materiales. Solamente es posible mencionar que, pese a que ambos tipos han sido producidos mediante la técnica de molido a temperatura ambiente, uno de ellos ha sido modificado mediante un tratamiento que involucra el uso de polímeros (en adelante, CR-A), mientras que el otro no ha sido sometido a ningún tipo de tratamiento (en adelante CR-B).

Para poder comparar la forma y textura de las partículas, se han tomado imágenes de estas utilizando un microscopio electrónico de barrido ambiental (ESEM), utilizando un equipo FEI Quanta 650 (Thermo Fisher). En particular, este estudio se ha ejecutado en condición de vacío bajo (*low vacuum mode*), con el objetivo de minimizar el daño causado a la muestra. Los valores utilizados en otros parámetros, como el voltaje, spot size, aumento, detectores utilizados o distancia de trabajo se muestran en las propias imágenes (Figura 3-19).

La principal conclusión a la vista de estas imágenes es que la forma de ambos tipos de partículas es angulosa y con textura rugosa, sin que puedan apreciarse grandes diferencias superficiales en su morfología.

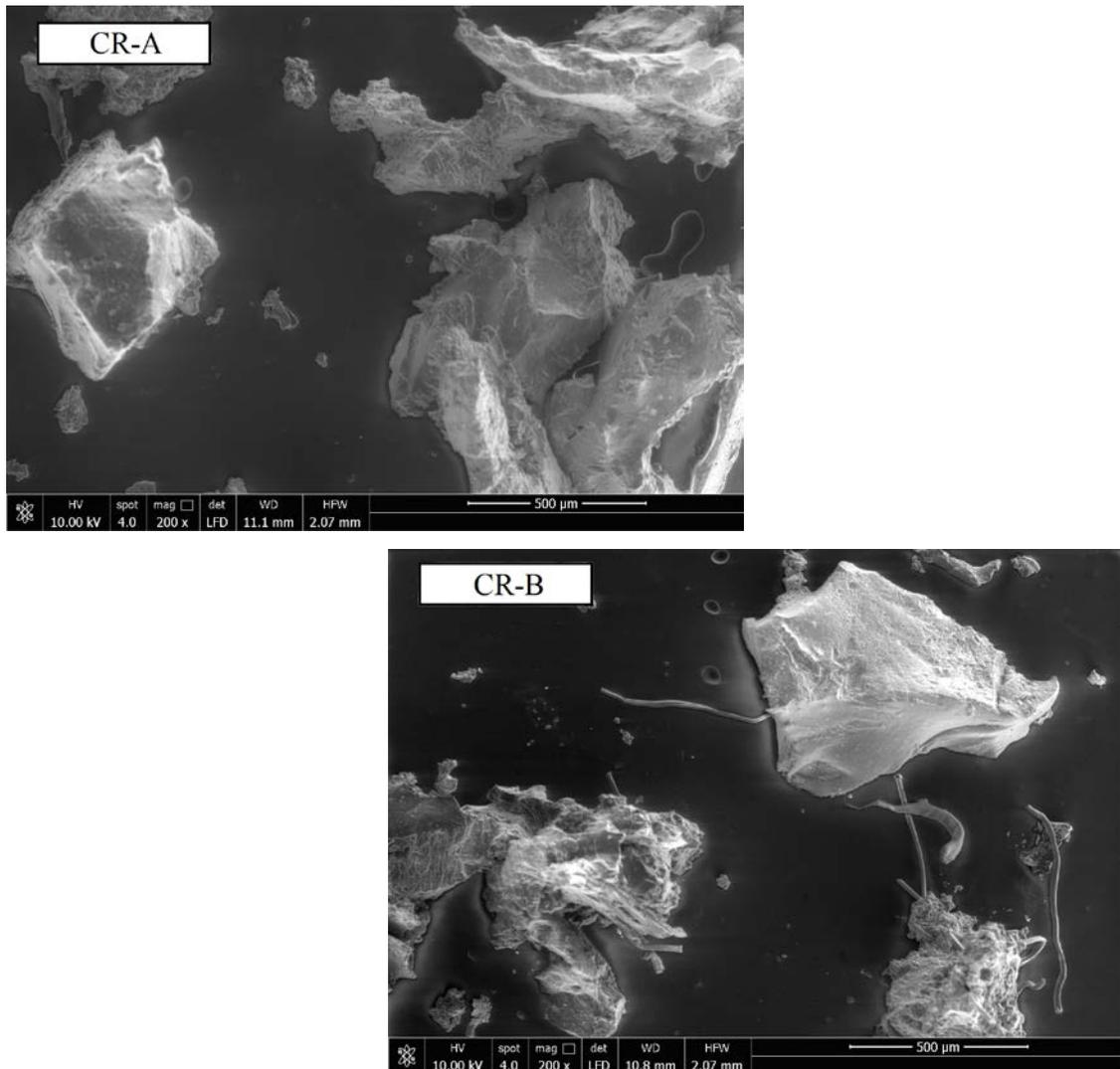


Figura 3-19. Imágenes de las partículas de polvo de NFU. (ESEM)

### 3.2.2. Áridos naturales

En este caso, como se indicaba anteriormente, los materiales han sido seleccionados por la empresa responsable del diseño de la mezcla. Por tanto, los áridos han sido suministrados con la garantía de que cumplen con todos los requisitos normativos para poder ser utilizados en el tipo de mezcla y en las condiciones establecidas para este proyecto. En cualquier caso, debido a que tanto en mezclas experimentales como en mezclas de referencia se van a utilizar los mismos áridos y en las mismas proporciones, conocer las características particulares no es un aspecto determinante para esta investigación.

### 3.2.3. Ligantes y aditivos

Para llevar a cabo este estudio se han empleado dos ligantes. En particular, para la fabricación de la mezcla de referencia se ha utilizado un betún modificado con polímeros, calificado como PmB 45/80-65, en cumplimiento con lo indicado por la normativa (SNR 640 436). Para las mezclas experimentales, por su parte, se ha utilizado un betún convencional, calificado como 50/70.

Las propiedades fundamentales de cada betún se muestran en la Tabla 3-19.

Tabla 3-19. Propiedades de los betunes

Propiedad	Norma	50/70	PmB 45/80-65
Penetración (25°C)	EN 1426	59 mm <sup>-1</sup>	56 mm <sup>-1</sup>
Temperatura de reblandecimiento	EN 1427	49,0°C	66,4°C

En cuanto a los aditivos utilizados, durante este estudio de reciclabilidad de las mezclas bituminosas se ha utilizado el aditivo A empleado en el estudio anterior (ver Sección 3.1.4.), sin que sea posible añadir más información sobre el mismo que la aportada en apartados anteriores.

### 3.2.4. Influencia del tiempo de acondicionamiento en las propiedades del betún

Antes de evaluar la influencia del uso de polvo de NFU en mezclas bituminosas se ha realizado un estudio de la influencia que este tiene sobre la viscosidad del betún. En este estudio se ha tratado de simular el contacto existente entre betún y polvo de NFU en una mezcla modificada por vía seca. Para ello, en contenedores cilíndricos de pequeño tamaño se han preparado muestras de betún de aproximadamente 60 gramos con diferentes porcentajes de polvo de NFU, las cuales se mantuvieron en estufa a 165°C durante distintos tiempos de acondicionamiento.

Con el objetivo de que, por un lado, la agitación del conjunto de betún y polvo de NFU sea la mínima posible pero, por otro, evitar que todo el caucho se acumule en el fondo, cada 30 minutos se procedió a remover la mezcla durante 30 segundos de forma manual. Para este estudio, utilizando el betún 50/70 anteriormente definido, se prepararon varias muestras utilizando dos porcentajes por cada tipo de polvo de NFU: 10% y 15% sobre el peso total del conjunto de betún y polvo. En cuanto al tiempo de acondicionamiento, se prepararon muestras con 30, 60, 120, 180, 240 y 300 minutos. Como referencia, se preparó una muestra de betún 50/70 en estado original y otras dos muestras de este mismo betún las cuales, con el fin de evaluar el posible efecto del envejecimiento, se mantuvieron en estufa a 165°C durante 120 y 300 minutos.

Una vez preparadas las muestras, estas se evaluaron mediante el ensayo de determinación de la viscosidad dinámica (EN 13302). Este ensayo, tal y como se especifica en la norma, consiste en la aplicación de un par de torsión aplicado a una aguja de forma cilíndrica en movimiento rotatorio en un recipiente especial, el cual contiene la muestra a medir. Mediante la medición de la resistencia relativa a la rotación de la aguja se determina la medida de viscosidad dinámica. En este caso particular, este ensayo fue ejecutado a una temperatura de 135°C y con una velocidad de rotación de 20 rpm. Para la realización de este ensayo se utilizó un reómetro modelo Physica MCR 301 (Anton Paar®, Austria).

### 3.2.5. Tipo y composición de las mezclas bituminosas desarrolladas

El tipo de mezcla bituminosa seleccionada para el desarrollo de esta investigación se corresponde con una mezcla bituminosa semidensa (codificada como SDA 4) con tamaño máximo de árido máximo fijado en 4 mm. Para su diseño se ha seguido lo establecido por la normativa suiza (SNR 640 436).

En particular, en lo que al contenido de huecos se refiere, de las diferentes opciones contempladas en dicha normativa se ha seleccionado la clase B, lo cual significa que debe diseñarse con el objetivo de obtener un contenido de huecos del 12% del volumen, permitiéndose que este oscile entre el 10% y el 14%.

#### 3.2.5.1. Composición de la mezcla bituminosa de referencia.

En cumplimiento con los requisitos de la normativa suiza, el betún utilizado en el diseño de esta mezcla es el betún PmB 45/80-65 descrito en la sección anterior. El contenido de ligante se ha fijado en un 6,2% del peso de la mezcla, manteniendo de esta forma la fórmula de trabajo original aportada por la planta asfáltica involucrada en el proyecto. La granulometría de la mezcla de referencia así como el huso delimitado por la norma SNR 600 436 se muestran en la Figura 3-20.

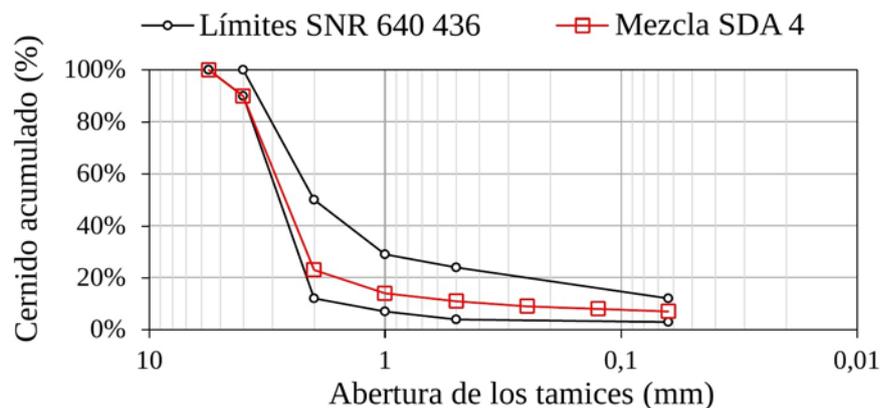


Figura 3-20. Granulometría de la mezcla SDA 4

### 3.2.5.2. Composición de las mezclas bituminosas experimentales

La gran diferencia de estas mezclas con respecto de la mezcla de referencia radica en el tipo de betún utilizado. Para su diseño se ha utilizado el betún 50/70 descrito anteriormente, el cual se espera que modifique sus propiedades debido al efecto del polvo de NFU. La composición de los áridos de las mezclas experimentales, y por tanto su granulometría, no varía respecto de la mezcla de referencia.

El objetivo es, por tanto, comparar entre una mezcla convencional que utiliza un betún modificado con polímeros y una mezcla experimental que utiliza un betún convencional modificada con polvo de neumático por vía seca, tratando de optimizar, en este caso, el tiempo de acondicionamiento. El contenido de polvo de neumático, para los dos tipos utilizados, se ha fijado en un 1% del peso de los áridos, lo cual, con la fórmula de trabajo utilizada, supone un 15% del peso conjunto de betún y polvo de neumático, teniendo en cuenta que las mezclas experimentales utilizan la misma cantidad de ligante que la mezcla de referencia.

### 3.2.6. Metodología de fabricación de las mezclas bituminosas en laboratorio

El protocolo de fabricación de las mezclas bituminosas comienza con el calentamiento previo de los áridos y del betún. Para la mezcla de referencia, los áridos han sido calentados a 185°C durante un mínimo de 4 horas, mientras que el betún PmB 45/80-65 se mantuvo unas 2 horas en estufa a 170°C, tal y como especifica el fabricante del mismo. Posteriormente, el conjunto de áridos y betún se mezclaron durante 4 minutos a 170°C.

Por su parte, para las mezclas modificadas, teniendo en cuenta que la temperatura ejerce una gran influencia sobre la interacción entre betún y polvo de neumático, se ha decidido utilizar la mayor temperatura posible, que en este caso, atendiendo a las indicaciones del fabricante del betún 50/70, se ha fijó en 170°C, manteniendo por tanto las mismas condiciones en términos de temperaturas que las utilizadas para la mezcla de referencia. El proceso de mezclado, por su parte, difiere ligeramente ya que, en primer lugar, se mezclan los áridos con el polvo de neumático durante 30 segundos para posteriormente, añadir el betún y proceder al mezclado durante 4 minutos.

Una vez obtenida la mezcla comienza el proceso de acondicionamiento. Comentar que este proceso de acondicionamiento también se ha realizado para la mezcla de referencia, con el fin de analizar la posible influencia del envejecimiento. Para ello, la mezcla se coloca en estufa a 165°C durante tres tiempos diferentes de acondicionamiento: 60, 90 y 120 minutos. Finalmente, una vez transcurrido este tiempo, se preparan las probetas que sean necesarias para la realización de los diferentes ensayos mediante el procedimiento de compactación pertinente.

### **3.2.7. Análisis de la influencia del tiempo de acondicionamiento en el comportamiento mecánico de la mezcla**

La evaluación de la influencia del tiempo de acondicionamiento sobre las propiedades de las mezclas bituminosas se ha llevado a cabo a través de diferentes ensayos de laboratorio. En primer lugar, se determinaron las propiedades volumétricas de las muestras preparadas con 60, 90 y 120 minutos de tiempo de acondicionamiento, siguiendo las especificaciones de la norma EN 12697-8, de igual manera a cómo se describe en el apartado 3.1.8.1.

Sin embargo, en este caso, dado que se espera un contenido de huecos superior al 10%, la determinación de la densidad aparente se ha determinado siguiendo el procedimiento D de la norma EN 12697-5, el cual especifica que la determinación de las dimensiones de la probeta debe hacerse por procedimiento geométrico. Para la determinación de la densidad máxima se ha utilizado el procedimiento A de la norma EN 122697-5. Las probetas utilizadas fueron fabricadas con un compactador de impactos, de acuerdo con la norma EN 12697-30, aplicando en este caso 50 golpes por cara.

Una vez determinadas sus propiedades volumétricas, estas mismas probetas fueron ensayadas mediante el ensayo Marshall, siguiendo las especificaciones recogidas en la norma EN 12697-34. Finalmente, para la realización del ensayo de sensibilidad al agua se prepararon muestras con 60 y 120 minutos de acondicionamiento aplicando, en este caso, 35 golpes por cara. La realización del ensayo se ajustó a lo indicado por la norma EN 12697-12, con la particularidad de que la rotura a tracción indirecta de las probetas se realizó a 22°C.

### **3.2.8. Estudio de la integración de las partículas de polvo de NFU en la mezcla bituminosa utilizando microscopía electrónica de barrido ambiental (ESEM)**

El objetivo de esta tarea es evaluar los cambios sufridos a nivel microscópico debidos a la interacción entre las partículas de polvo de NFU y el betún durante la fabricación de las mezclas bituminosas. Para ello, mediante la utilización del microscopio electrónico de barrido ambiental, se han tomado imágenes de las muestras preparadas con polvo de NFU del tipo CR-B con distinto tiempo de acondicionamiento, en particular, 60 y 120 minutos. Para realizar esta tarea, se han utilizado muestras con unas dimensiones de  $28 \times 47 \times 10 \text{ mm}^3$ , preparadas a partir del núcleo de una probeta cilíndrica de iguales dimensiones que las preparadas para el ensayo Marshall.

Para poder realizar este análisis en las mejores condiciones de seguridad y con la mayor precisión posible, las muestras se impregnaron con una resina, obteniendo de esta manera una muestra sólida (sin huecos) y menos deformable. Para ello, a temperatura ambiente, el conjunto de resina y muestra fueron sometidas a vacío de 1 mbar. Una vez solidificado el conjunto, las superficies de la muestra fueron pulidas por medios manuales, obteniéndose finalmente una superficie apta para su análisis mediante el uso del microscopio.

El análisis de las muestras se ha realizado con un equipo FEI Quanta 650 (Thermo Fisher). En particular, este estudio se ha ejecutado en condición de vacío bajo (*low vacuum mode*), con el objetivo de minimizar el daño causado a la muestra. Los valores utilizados en otros parámetros, como el voltaje, *spot size*, aumento, detectores utilizados o distancia de trabajo se especifican en la sección de resultados, particularizados para cada una de las imágenes tomadas.

### **3.2.9. Análisis del envejecimiento y la reciclabilidad de las mezclas modificadas con polvo de NFU.**

En esta última etapa se evalúa el envejecimiento y la reciclabilidad de las mezclas desarrolladas en etapas anteriores. Partiendo de los resultados obtenidos, se seleccionan 120 minutos como el tiempo de acondicionamiento para la realización de estudio. A partir de ahí, para realizar el proceso de envejecimiento se sigue la misma metodología anteriormente descrita en la [Sección 3.1.10](#), con la particularidad de que, en este caso el periodo de acondicionamiento de la muestra (120 minutos a 165°C) se considera como el método de envejecimiento a corto plazo. Para el envejecimiento a largo plazo se utiliza nuevamente el método *Long-Term Oven Aging (LTOA)*, manteniendo las probetas en estufa a 85°C durante 120 horas.

A diferencia del estudio de reciclabilidad explicado en la [Sección 3.1.10](#), en este caso, tras el proceso de envejeciendo a largo plazo, las probetas envejecidas, en vez de desmenuzarse para su uso como fresado, han sido ensayadas. Con esto se pretende evaluar el efecto del envejecimiento a largo plazo sobre las características de la mezcla. Para este estudio se prepararon probetas para ejecutar el ensayo Marshall y el ensayo de sensibilidad al agua, siguiendo la metodología descrita en la [Sección 3.2.7](#).

Por otro lado, volviendo a amasar la mezcla envejecida (generada a partir de desmenuzar las probetas envejecidas) junto con la única incorporación del aditivo rejuvenecedor, se fabrican nuevas mezclas bituminosas (en adelante, mezclas recicladas). El objetivo de esta fase, más que en evaluar el posible uso como fresado de estas mezclas, está más enfocado a determinar el efecto de un aditivo rejuvenecedor sobre el betún modificado con polvo de NFU por vía seca, comparándolo con el efecto causado sobre el betún modificado con polímeros de la mezcla de referencia.

Para ello, sobre la mezcla previamente calentada a 160°C se pulveriza el rejuvenecedor en una dosis del 5% del peso del betún. Esta dosis ha sido seleccionada por los miembros del proyecto teniendo en cuenta la experiencia anterior de los investigadores del Empa [139]. Posteriormente se incorpora al mezclador y procede con la mezcla del conjunto durante 4 minutos aproximadamente. Tras el amasado, se preparan las probetas necesarias para ejecutar los mismos ensayos que en fases anteriores.

Finalmente, en paralelo a estos experimentos, se realiza una evaluación de las características del betún en cada una de las distintas fases: tras el acondicionamiento, tras el envejecimiento a largo plazo y tras el re-amasado de la mezcla envejecida junto con el aditivo. Para ello, se extrajeron muestras de betún en cada una de estas fases y para cada una de las mezclas, determinándose para cada una de ellas el módulo complejo y el ángulo de fase, siguiendo la misma metodología descrita en la [Sección 3.1.7.1](#).

### 3.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS

En este apartado se recoge la metodología llevada a cabo para ejecutar el análisis estadístico de los resultados obtenidos. De esta forma, dadas las características de los experimentos llevados a cabo, se han aplicado los principios de la estadística inferencial. Esta parte de la estadística comprende los métodos y los procedimientos que sirven para determinar propiedades de una población estadística a partir de una parte de esta.

De esta forma, para cada uno de los ensayos ejecutados se han analizado los resultados aplicando diferentes procedimientos, en función de las características de cada muestra, determinando en cada caso si la influencia ejercida por las distintas variables involucradas en el estudio es significativa o no en términos estadísticos. Esto se ha evaluado a través del valor del parámetro *p-value*, considerando un nivel de significancia de 0,05. Para determinar este valor, en función de las características de la muestra, se han aplicado los procedimientos recogidos en la Tabla 3-20.

Tabla 3-20. Métodos utilizados para ejecutar el análisis estadístico de los resultados

Tamaño de la muestra	Paramétrica	No paramétrica
n = 2	Prueba t o z	Prueba de la U de Mann-Whitney
n > 2	ANOVA de un factor	Prueba de Kruskal-Wallis

Previamente a ejecutar alguno de estos métodos, es por tanto necesario ejecutar una prueba de normalidad para determinar si se trata de una muestra paramétrica (distribución normal) o no paramétrica (distribución no normal). Para realizar esta prueba se ha utilizado el test de Shapiro-Wilk, apropiado para tamaños de muestra pequeños.

Vista la metodología aplicada para ejecutar el análisis estadístico, es necesario destacar que cuando en el análisis de los resultados se hable de diferencias significativas se estará haciendo referencia a que el análisis estadístico así lo ha reflejado a través del *p-value*. Además, en la representación gráfica de los resultados, en aquellos ensayos donde sea de aplicación, se ha representado mediante barras de error el intervalo de confianza del 95%, el cual es también indicador de si las diferencias entre muestras son o no significativas (en función del solape entre intervalos de confianza).



## **CAPÍTULO IV – RESULTADOS**



## **4.1. ESTUDIO DE LA UTILIZACIÓN DE RESIDUOS INDUSTRIALES Y FRESADO EN MEZCLAS BITUMINOSAS**

En este apartado se muestran los resultados obtenidos en las distintas fases del estudio sobre el uso de materiales alternativos en mezclas bituminosas, previamente descrito en la [Sección 3.1](#). En primer lugar, se analizan los resultados del estudio realizado para analizar la influencia de los aditivos utilizados, para, a continuación, presentar los resultados de los ensayos obtenidos para cada una de las mezclas propuestas. A partir de aquí se realiza la selección de las cuatro mezclas con mayor interés y se muestran los resultados relativos el comportamiento dinámico de estas mezclas. Finalmente, se incluyen los resultados del estudio de reciclabilidad.

### **4.1.1. Análisis de la influencia de los aditivos utilizados en las propiedades del betún**

En esta sección se muestran los resultados del estudio llevado a cabo para analizar cómo afecta el uso de los aditivos a las características del betún del fresado. Como se especificó anteriormente, la selección de los aditivos y del contenido a utilizar de los mismos no ha sido realizado en este trabajo, sino que estas decisiones fueron tomadas por otros socios del proyecto AlterPave. Por tanto, los resultados presentados en esta sección sirven para valorar la influencia que tienen los aditivos sobre las propiedades del betún así como de complemento para el posterior análisis de los resultados obtenidos en las mezclas bituminosas.

#### *4.1.1.1. Determinación del módulo complejo y el ángulo de fase*

El resultado se ha representado en la Figura 4-1 a través de las curvas maestras, calculadas según la metodología descrita en la [Sección 3.1.7.1](#). En esta misma figura se representa también la variación del parámetro  $a_T$  en función de la temperatura (indicador de la influencia que los cambios de temperatura ejercen sobre la rigidez del betún).

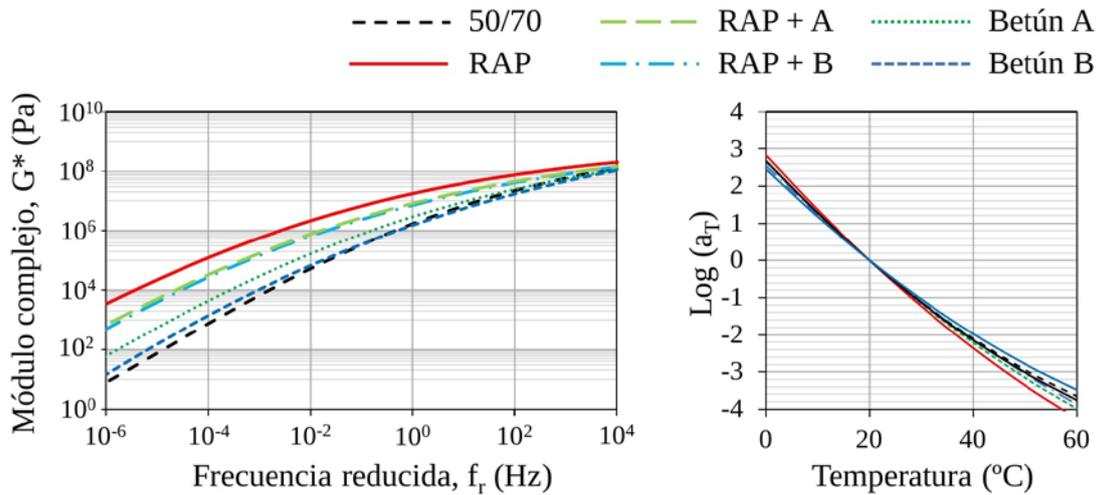


Figura 4-1. Curvas maestras de módulo complejo ( $G^*$ )

En los gráficos se ve claramente la diferencia que hay entre el betún 50/70 y el betún extraído del fresado (RAP). Si bien es cierto que se desconocen las propiedades originales del betún contenido en el fresado, el grado de envejecimiento de este último se manifiesta claramente en los resultados, mostrando una rigidez significativamente mayor a la mostrada por el betún 50/70. Por otro lado, analizando la variación del parámetro  $a_T$ , es posible concluir que el betún 50/70 muestra una menor susceptibilidad a variar su rigidez en función de la temperatura, en comparación con el betún extraído del fresado.

Con la incorporación de los aditivos sobre el betún reciclado (RAP), se ve cómo en ambos casos la rigidez disminuye. Sin embargo, a pesar de esa reducción, los resultados están todavía lejos de parecerse a los mostrados por el betún 50/70. Respecto del parámetro  $a_T$ , los resultados indican que la susceptibilidad a la temperatura también disminuye con la incorporación de los aditivos, acercándose a la curva asociada al betún 50/70. Respecto del tipo de aditivo, no se aprecian grandes diferencias entre utilizar uno u otro en las muestras compuestas exclusivamente por betún envejecido.

Sin embargo, en las combinaciones de un 60% de betún 50/70 con un 40% de betún reciclado, al cual se le ha incorporado un 2,5% de aditivo (betún A y betún B), sí que se obtienen valores de rigidez mucho más cercanos a los del betún 50/70. En este caso, la muestra preparada con el aditivo B muestra valores de rigidez muy próximos al betún 50/70 mientras que, en la muestra con aditivo A, esta reducción en la rigidez no es tan acusada, manteniéndose en valores de rigidez superiores a los del betún 50/70. En ambos casos, la susceptibilidad a la temperatura se aproxima a la del betún 50/70, siendo incluso menor en el caso de la muestra preparada con aditivo B.

En cuanto al ángulo de fase, en la Figura 4-2 se ha representado el diagrama de Black de cada una de las muestras. En esta figura se pone de manifiesto el comportamiento típico de un betún asfáltico donde, manteniendo la temperatura constante, a medida que aumenta el valor del módulo complejo (frecuencias más bajas de ensayo) se reduce el valor del ángulo de fase, denotando, por tanto, un comportamiento más elástico.

Comparando las diferentes muestras, se observa que el betún 50/70 generalmente muestra mayor ángulo de fase, lo cual indica que se trata de un betún menos elástico que el resto de muestras. El betún A y el betún B, por su parte, tienden a incrementar el ángulo de fase con respecto del betún del fresado, lo cual indica que estos betunes tienden hacia un comportamiento más viscoso, intermedio entre el betún del fresado y el del betún 50/70.

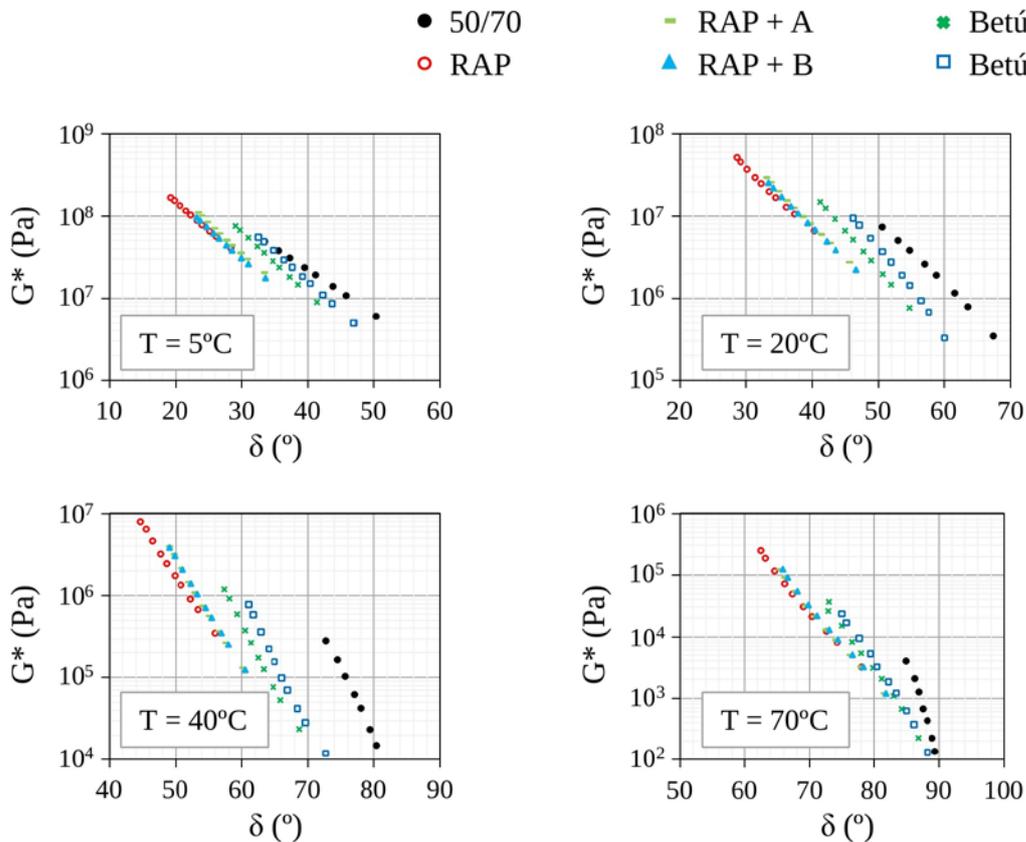


Figura 4-2. Diagrama de Black a diferentes temperaturas de ensayo

Estos resultados indican que, en muestras compuestas en un 60% por betún 50/70, con la incorporación del aditivo A en la cantidad seleccionada, no se consigue llegar a los valores de módulo complejo ni de ángulo de fase del betún 50/70. En el caso del aditivo B, la diferencia con el betún 50/70 tiene más que ver con los resultados del ángulo de fase, donde sí se aprecian diferencias significativas, mostrando en este caso valores de modulo complejo similares a los del betún 50/70.

Sin embargo, es necesario tener en cuenta que estos ensayos se han realizado con la garantía de que existe un grado de mezcla perfecto entre ambos betunes y el aditivo. Durante la fabricación de las mezclas bituminosas es muy difícil garantizar que esta mezcla entre los distintos betunes y el aditivo se produzca en las mismas condiciones, lo cual podría afectar a la composición final del betún, y por tanto, a sus características.

Otro aspecto fundamental a tener en cuenta es la cantidad de betún 50/70 que finalmente incorpore cada una de las mezclas, atendiendo a la fórmula de trabajo resultante para cada una. En este sentido, diferencias en el ratio entre betún 50/70 y betún envejecido de las mezclas con respecto del ratio utilizado para la realización de este ensayo también pueden provocar desviaciones en los resultados.

#### 4.1.1.2. Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) test

Los resultados de este ensayo se representan en las Figuras 4-3 y 4-4, donde se muestran los valores obtenidos para el parámetro  $J_{nr}$  y el parámetro  $R$ , ambos asociados a los ciclos del ensayo ejecutado a 3,2 kPa.

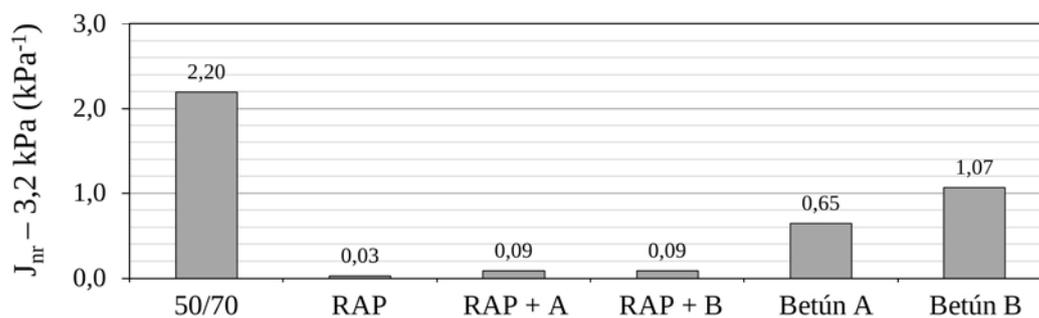


Figura 4-3. Resultados del ensayo MSCR. Valores del parámetro  $J_{nr}$

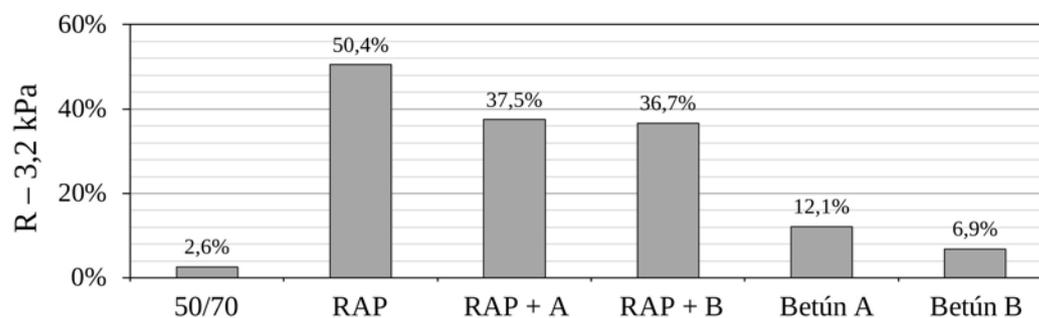


Figura 4-4. Resultados del ensayo MSCR. Valores del parámetro  $R$

En relación con estos parámetros ( $J_{nr}$  y  $R$ ), es posible encontrar estudios que establecen categorías de uso del betún en función del valor del parámetro  $J_{nr}$  en los ciclos de carga a 3,2 kPa. Estas clasificaciones, pese a que puedan estar más o menos contrastadas, sirven como referencia a la hora de analizar los resultados, y con este fin, en la Tabla 4-1 se muestra una de estas clasificaciones, donde el resultado de este ensayo se relaciona con las características del tráfico [140].

Tabla 4-1. Usos del betún en función del parámetro  $J_{nr}$  (ensayo MSCR)

$J_{nr}$ (3,2 kPa)	Categoría	Características del tráfico
$4,5 > J_{nr} > 2,0$	S – <i>Standard</i>	$< 10^6$ ejes equivalentes y tráfico estándar
$2,0 > J_{nr} > 1,0$	H – <i>Heavy</i>	$10^6$ - $30^6$ ejes equivalentes o tráfico lento
$1,0 > J_{nr} > 0,5$	V – <i>Very Heavy</i>	$> 30^6$ ejes equivalentes o tráfico parado
$0,5 > J_{nr}$	E – <i>Extreme</i>	$> 30^6$ ejes equivalentes y tráfico parado

Clasificando las diferentes muestras ensayadas de acuerdo con lo establecido en la tabla, el betún 50/70 tomado como referencia sería de aplicación en una situación estándar de tráfico (categoría S). Esta clasificación está bastante de acuerdo con las limitaciones que impone el PG-3 en el uso de este betún, donde se limita su uso en función de la zona térmica estival estableciendo, por ejemplo, para zonas clasificadas como cálidas una categoría de tráfico máxima de T2.

En el punto opuesto está el betún recuperado del fresado, el cual, se muestra muy poco deformable y con una alta recuperación elástica. Al incorporar sobre este betún los diferentes aditivos no se consigue una gran influencia sobre el parámetro  $J_{nr}$ , aumentando este ligeramente respecto de su valor original pero manteniéndose en valores muy bajos. En el parámetro  $R$ , por su parte, la influencia de los aditivos sí tiene mayor importancia, pero en cualquier caso, estos valores se mantienen mucho más cercanos a los obtenidos en el betún del fresado que a los obtenidos por el betún 50/70.

En lo que respecta a la combinación de betunes, éstos si muestran valores más altos en el parámetro  $J_{nr}$  y una reducción significativa en el parámetro  $R$ . Pese a este cambio respecto del betún envejecido, que es mayor cuando se utiliza el aditivo B, los resultados siguen siendo considerablemente inferiores al mostrado por el betún 50/70, denotando un betún más elástico y menos deformable. En particular, según la tabla, estos betunes serían aptos para un tráfico de categoría V en el caso del betún A, y para un tráfico de categoría H en el caso del betún B.

Comparando entre aditivos, la muestra con aditivo B es por tanto la que acerca más sus resultados a los del betún 50/70. En línea con los resultados de módulo complejo y ángulo de fase mostrados anteriormente, estos resultados denotan que el betún B es un betún más viscoelástico (mayor valor de  $\delta$ ) y deformable (menor valor de  $G^*$ ) que el betún A.

Estos resultados son por tanto un indicio de que el betún resultante en la mezcla bituminosa, considerando que en torno a un 40% del betún sea aportado por el fresado, le transmitirá a esta un mejor comportamiento ante el fallo por deformación permanente, en comparación con la utilización del betún 50/70. En cualquier caso, al igual que se ha comentado para la rigidez, el grado de mezcla conseguido va a condicionar en gran medida su comportamiento, así como el resto de variables que también puedan ejercer algún tipo de influencia sobre el comportamiento de la mezcla ante este modo de fallo (tipo de árido, contenido de ligante, contenido de huecos, etc.).

#### 4.1.1.3. Linear Amplitude Sweep (LAS) test

Las curvas que relacionan la deformación con el número de ciclos hasta rotura, se muestra en la Figura 4-5. Destacar que en esta figura no se ha representado el resultado relativo al betún recuperado del fresado debido a que, por las características del mismo y por las limitaciones del equipo utilizado, este ensayo no ha podido ser ejecutado en las mismas condiciones que las utilizadas para el resto de muestras.

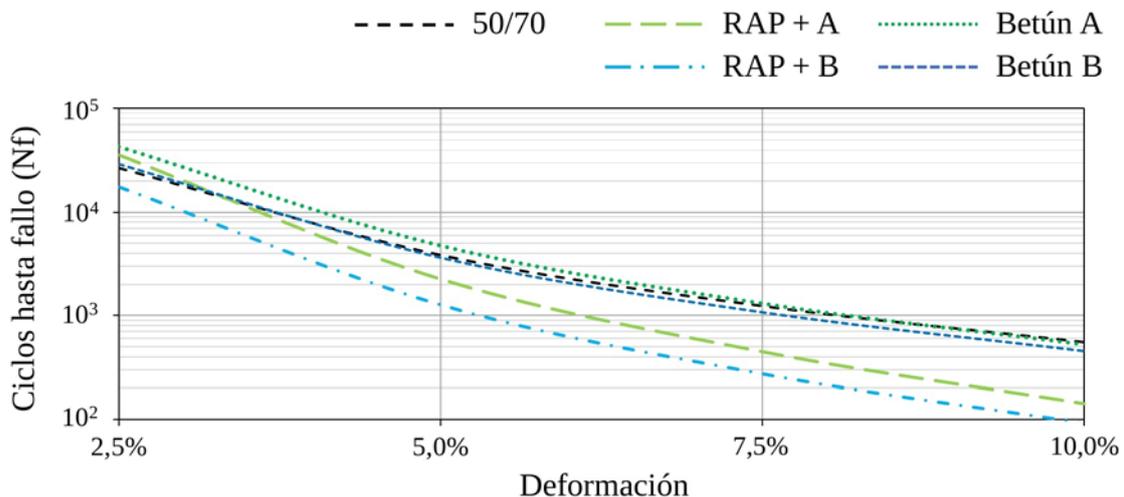


Figura 4-5. Resultados del ensayo Linear Amplitude Sweep (LAS) test.

Se observa cómo a deformaciones bajas las diferencias entre las distintas muestras se reducen, acercándose los resultados a la curva del betún 50/70. Analizando únicamente el RAP + A y RAP + B, ambas muestran un mejor comportamiento a deformaciones bajas que va empeorando, en comparación con el betún 50/70, a medida que dicha deformación aumenta. Entre ellas, se ve cómo la muestra que utiliza el aditivo A tiene a todos los niveles de deformación un mejor comportamiento que la muestra en que se emplea el aditivo B. Por su parte, el betún A y el betún B muestran un resultado similar al del betún 50/70 para todas las deformaciones propuestas, siendo este ligeramente mejor para el betún A.

Sin embargo, al igual que para el ensayo anterior existían clasificaciones que relacionaban el resultado del ensayo con la situación real de la mezcla bituminosa, en este caso existen estudios donde se relaciona el comportamiento a fatiga de la mezcla con el resultado obtenido en este ensayo para una determinada deformación.

De acuerdo con las investigaciones realizadas por Tran *et al.* (2012), al aplicar un 5% de deformación se obtiene la mejor correlación entre este ensayo y el comportamiento a fatiga de la mezcla bituminosa [96]. Zaumanis *et al.* (2014) en su estudio también utilizan este mismo criterio para comparar los distintos resultados [110]. Por su parte, Hintz *et al.* (2011) consideran en su estudio que un 4% de deformación se correlaciona razonablemente bien con el área fisurada en diferentes secciones reales [141].

En línea con estos autores, se han tomado como referencia los resultados obtenidos para el 5% de deformación, representados en la Figura 4-6.

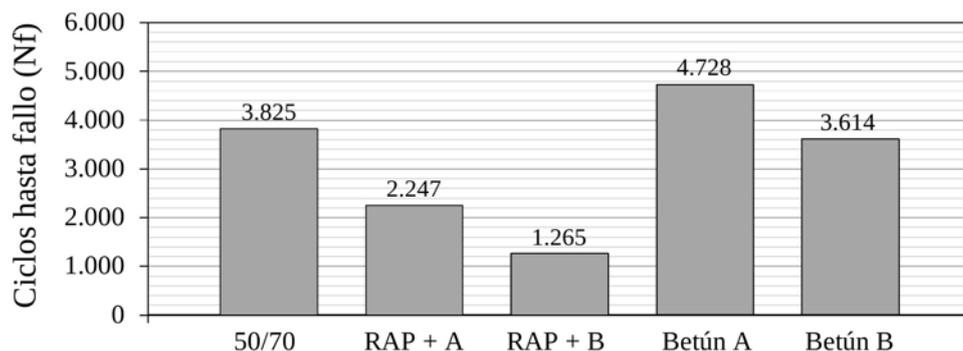


Figura 4-6. Resultados del ensayo Linear Amplitude Sweep (LAS) test. Ciclos hasta el fallo para un 5% de deformación

La utilización del aditivo A resiste un mayor número de ciclos que la utilización del aditivo B, tanto para la muestra compuesta únicamente por fresado como para la muestra que combina ambos betunes. De hecho, el betún A resiste un número de ciclos superior al del betún 50/70, lo que augura un buen comportamiento a fatiga de las mezclas que lo utilicen. Por su parte, el betún B también obtiene un buen resultado, alcanzando un número de ciclos muy cercano al del betún 50/70. Sin embargo, estos resultados chocan en cierta medida con los resultados de ensayos anteriores, donde el betún A se había mostrado más rígido y con menor capacidad de recuperación elástica que el betún B, lo cual, en principio, suele estar asociado con una menor resistencia a esfuerzos de fatiga.

A la vista de estos resultados es posible establecer que existe una influencia significativa por parte de los aditivos en las propiedades del betún. Con la dosis seleccionada, la influencia ejercida por los aditivos no es lo suficientemente grande como para llevar al betún envejecido a resultados similares a los del betún 50/70. Sin embargo, cuando se combinan ambos betunes, los resultados sí se muestran mucho más cercanos, pese a mantener estos betunes una mayor rigidez que el betún de referencia.

En cuanto a los dos modos de fallo analizados, los resultados son muy positivos ya que, comparando con el betún de referencia, se comportan mejor frente a deformaciones permanentes a la vez que frente a fatiga se mantienen en un nivel similar, mejorándose incluso en el caso de utilizar el aditivo A.

Trasladando este comportamiento a la mezcla bituminosa, la influencia del betún hará que las tendencias vayan en esta misma línea. Sin embargo, el grado de homogeneidad del ligante en la mezcla jugará un papel muy importante en los resultados, así como las influencias que puedan ejercer sobre el comportamiento el resto de variables involucradas, como pueden ser el tipo de árido utilizado, el contenido y composición del betún o las propiedades volumétricas de las mezclas, entre otras.

#### **4.1.2. Estudio de la mezcla y obtención de la fórmula de trabajo**

Visto el efecto de los aditivos sobre las propiedades del betún, en esta sección se determina el comportamiento de las mezclas bituminosas (ver [Tabla 3-13](#)). En primer lugar, siguiendo la metodología descrita en la [Sección 3.1.8.1](#), se determinan las propiedades volumétricas y la composición final del ligante de cada una de las mezclas. Posteriormente, se muestran los resultados del ensayo Marshall, el ensayo de sensibilidad al agua y el ensayo de rodadura.

#### 4.1.2.1. Contenido de huecos

Como ya se indicaba en el capítulo anterior, la determinación del contenido de ligante se ha realizado de forma experimental, añadiendo diferentes cantidades hasta conseguir aquella cantidad que resulte en un contenido de huecos adecuado a la normativa. El contenido de betún final se ha expresado en la Figura 4-7 como el porcentaje del volumen total de la mezcla ocupado por el ligante. De esta forma, es posible comparar la cantidad de ligante utilizada por cada una de las mezclas en una unidad de volumen de mezcla totalmente ejecutada, eliminando así las diferencias causadas por la diferencia en el peso específico de los materiales.

En la figura 4-7, se distingue entre el betún de aportación (betún 50/70) y el betún aportado por el fresado (betún reciclado). Destacar que el contenido de betún reciclado viene impuesto por el contenido de fresado de cada una de las mezclas de forma que, como puede verse en las características del fresado (Sección 3.1.2.), este aporta una cantidad de betún equivalente al 4,2% de su peso. El contenido de betún 50/70 es por tanto la variable con la que se realiza el diseño, ajustando esta cantidad en cada mezcla en función de las propiedades volumétricas obtenidas.

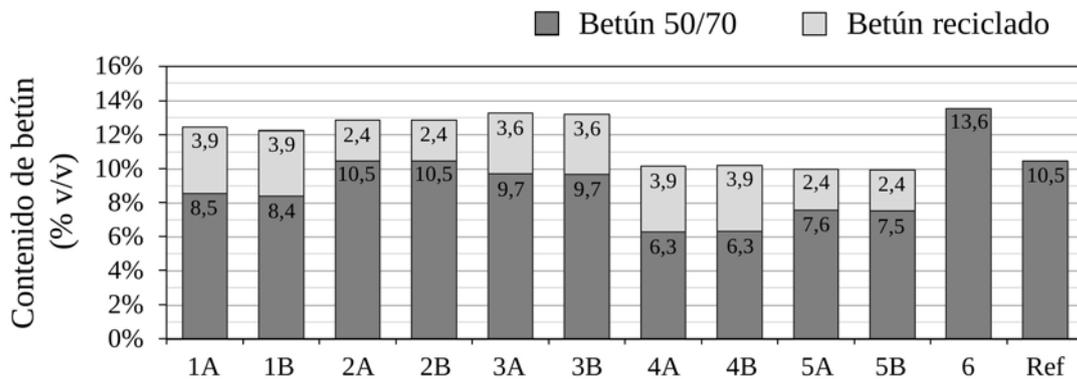


Figura 4-7. Contenido de ligante de las mezclas bituminosas (% v/v)

Es necesario destacar que, de acuerdo con el criterio establecido para esta fase de diseño, se ha utilizado el mismo contenido de ligante en cada una de las mezclas que comparten una misma composición, independientemente del aditivo utilizado (1A y 1B, 2A y 2B, etc.). De esta forma, una vez se determinen las propiedades volumétricas, la existencia de diferencias en el contenido de huecos entre mezclas que comparten composición servirá como indicador de diferencias en términos de trabajabilidad de la mezcla, siendo el aditivo utilizado la única diferencia entre ellas.

Las pequeñas diferencias encontradas en el contenido de betún de las mezclas 1 y 5 se deben a que, como se puede verse posteriormente en la Figura 4-9, existen ciertas diferencias en el porcentaje de huecos. Estas diferencias, dado que el cálculo se realiza sobre el volumen total, afectan al cálculo del contenido de betún, provocando esas pequeñas desviaciones. Con todo esto se ha conseguido que las propiedades volumétricas de cada una de las mezclas sean adecuadas y se ajusten en gran medida a las exigencias normativas.

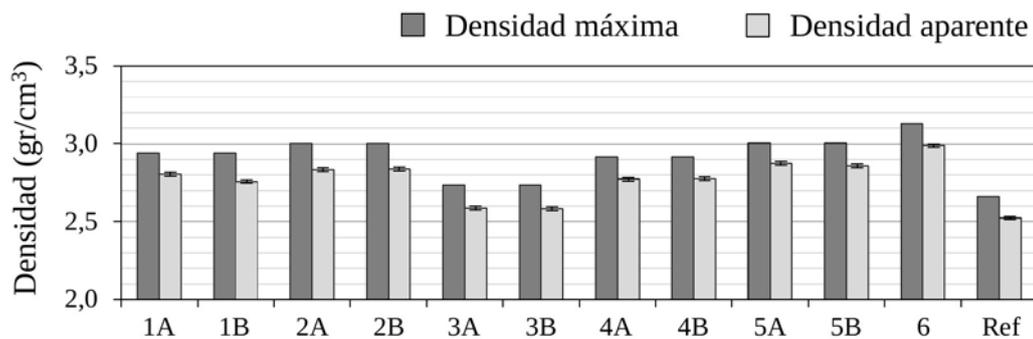


Figura 4-8. Propiedades volumétricas de las mezclas bituminosas. Densidad

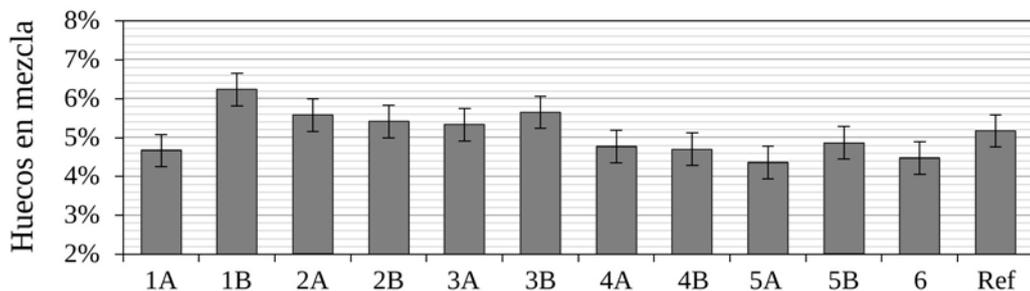


Figura 4-9. Propiedades volumétricas de las mezclas bituminosas. Huecos en mezcla

Vistos los resultados, en primer lugar destacar que al utilizar materiales con mayor peso específico, la densidad aparente de las mezclas bituminosas experimentales toma valores significativamente mayores a los de la mezcla de referencia. Principalmente vemos cómo las mezclas con escoria negra son las mezclas con mayor densidad. Por ejemplo, las mezclas número 2, 5 y 6 se encuentran por encima de los  $2,80 \text{ g/cm}^3$ , muy superiores a los  $2,52 \text{ g/cm}^3$  de la mezcla de referencia.

En cuanto a los huecos en mezcla, solo hay una mezcla cuyo contenido se sale ligeramente de los límites marcados por el PG-3. En concreto, se trata de la mezcla 1B, cuyo contenido de huecos es del 6,2%, ligeramente superior al límite establecido por el PG-3 en un 6%. Además, las mezclas número 1 son el único par de mezclas que, entre sí, muestran diferencias significativas en el contenido de huecos.

Entre distintas composiciones, se puede ver cómo la mayoría de mezclas tienen un porcentaje entre el 5,0% y 5,5%, encontrando alguna con valores ligeramente inferiores (mezclas 4 y 5). Estos resultados, exceptuando la mezcla 1, evidencian que no existe ninguna diferencia significativa en la trabajabilidad de las mezclas independientemente de que se utilice el aditivo A o se utilice el aditivo B.

Por otro lado, a la vista del contenido de betún, es posible clasificar a las mezclas en dos grupos en función de su contenido total, diferenciando entre mezclas con un contenido total próximo al 13,0% v/v y mezclas con un contenido cercano al 10,5% v/v. En este segundo grupo se encuentra la mezcla de referencia, la cual marca el contenido de ligante habitual de este tipo de mezclas que, a modo de referencia, corresponde a un 4.3% del peso de la mezcla.

Analizando la composición de ambos grupos se aprecia que, por un lado, están las mezclas que incluyen arena de moldeo en su composición (mezclas 1, 2, 3 y 6), con un contenido de betún total cercano al 13% v/v, y por otro, las mezclas que no incorporan este material (mezclas 4, 5 y referencia), estas últimas con un contenido de ligante cercano al 10,5% v/v.

Esta división indica una posible influencia de la arena de moldeo en el contenido de ligante. Para evaluar esta influencia con mayor precisión parece oportuno utilizar aquellas mezclas que únicamente difieren en el material utilizado en la fracción fina. En particular, las mezclas 1, 2, 4 y 5 son ideales para realizar este análisis. Recordando su composición, en la Figura 4-10 se muestra de una forma clara cómo la única diferencia entre estos 2 pares de dosificaciones es la presencia en la fracción fina de arena de moldeo o de árido calizo, alternativamente.

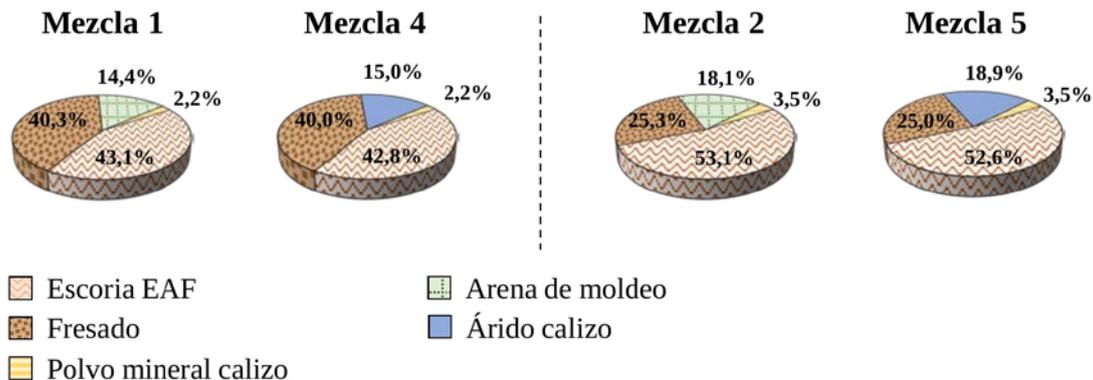


Figura 4-10. Dosificaciones seleccionadas para analizar la influencia de la arena de moldeo en el contenido de ligante

La comparación del contenido de ligante de aportación de estas mezclas se muestra de nuevo en la Figura 4-11, de forma que se puede ver claramente cómo la presencia de arena de moldeo afecta directamente al contenido de ligante. En estas mezclas, el contenido de ligante de aportación se incrementa en torno a un 30-40% cuando se utiliza la arena de moldeo, lo que supone un incremento en el ligante total en torno al 20-30%.

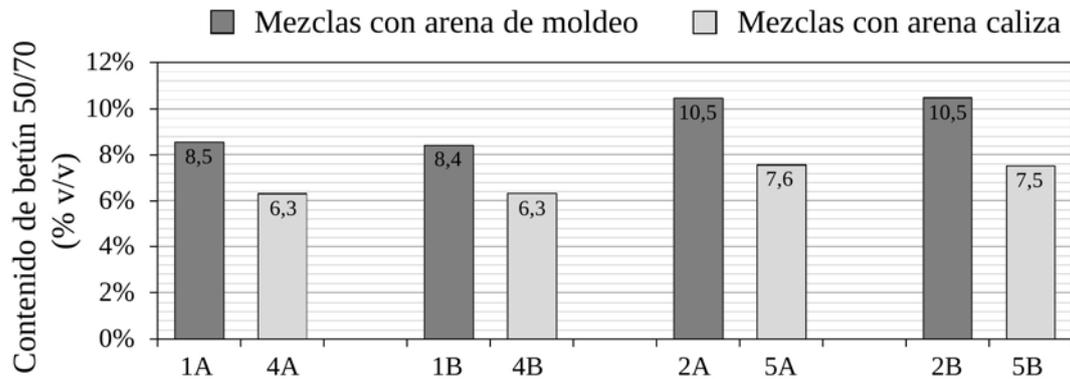


Figura 4-11. Comparación del contenido de ligante entre mezclas con arena de moldeo y mezclas con arena caliza

Como una forma alternativa de corroborar este análisis, se ha considerado conveniente realizar un ensayo de compactabilidad. De esta forma se pretende evaluar las posibles diferencias por medio de otro método de compactación alternativo a la compactación mediante golpes del método Marshall, como es la compactación mediante máquina giratoria. Para ello se han utilizado las mezclas 2A y 5A, utilizando en este caso la misma cantidad de betún (10% v/v). Los resultados obtenidos se representan en la Figura 4-12 a través de la curva que relacionan la energía de compactación con la densidad alcanzada y la curva que relaciona el contenido de huecos con los giros aplicados.

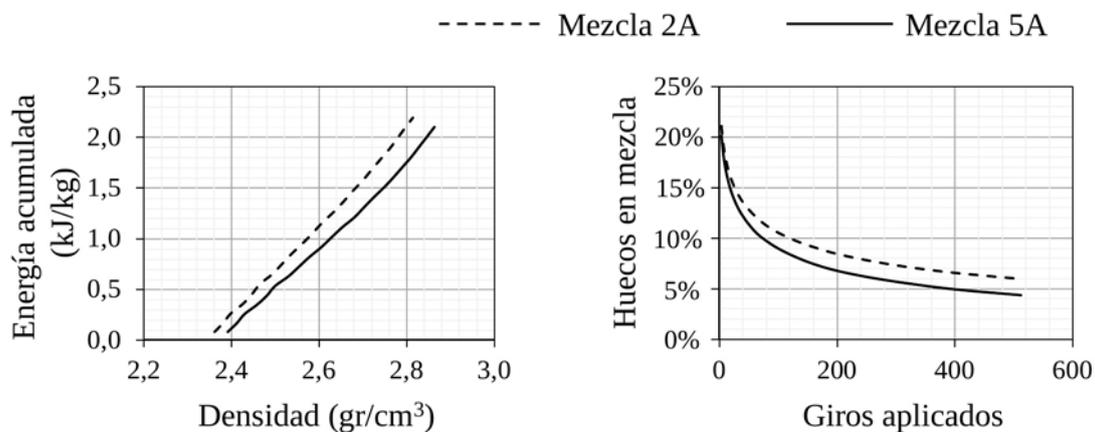


Figura 4-12. Resultados del ensayo de compactabilidad con máquina giratoria

A la vista de estos resultados es posible confirmar la diferencia en la trabajabilidad de las mezclas, mostrándose claramente cómo para alcanzar una misma densidad es necesario aplicar más energía de compactación en la mezcla que incorpora arena de moldeo que la necesaria para la mezcla con caliza.

Analizando las posibles razones, en el capítulo relativo al estado del arte se mostraba cómo diferentes estudios asociaban una mayor demanda de ligante a la mayor porosidad y absorción de los materiales, y que este fenómeno se acentuaba cuando se utilizan en la fracción fina [32,59]. La justificación en este caso también parece encontrarse en la mayor absorción de la arena de moldeo (2,2% según EN 1097-6) en comparación con la arena caliza (0,5% según EN 1097-6).

Este hecho, por tanto, evidencia la gran importancia que tiene el caracterizar convenientemente este tipo de materiales en laboratorio, de forma que se puedan detectar este tipo de inconvenientes. En este caso, la mayor demanda de ligante debida al uso de la arena de moldeo puede condicionar enormemente la viabilidad de la mezcla, pudiendo suponer un límite a la cantidad de arena a utilizar en las mezclas bituminosas

Por último, volviendo sobre el conjunto de mezclas, es necesario destacar el importante ahorro de ligante de aportación conseguido en las mezclas experimentales gracias a la aportación realizada por el fresado junto con los aditivos. Por ejemplo, las mezclas número 4 reducen en un 40% la cantidad de betún 50/70 utilizada por la mezcla de referencia, siendo estas las mezclas con menor cantidad de ligante de aportación utilizado. A la espera de confirmar un buen comportamiento mecánico, estos resultados indican que, al menos en términos volumétricos, la incorporación de fresado en la mezcla junto con el uso de aditivos permite conseguir mezclas bituminosas con un ahorro muy importante en la cantidad de betún virgen utilizado.

#### 4.1.2.2. *Ensayo Marshall*

Este ensayo, como ya se comentó en el capítulo anterior, no es de obligada ejecución según la normativa española. Sin embargo, sus resultados sirven para conocer el comportamiento mecánico de las mezclas ensayadas. Es especialmente interesante el valor del cociente Marshall. Este parámetro es un reconocido indicador de la rigidez y de la resistencia a deformación permanente de la mezcla bituminosa. En general, valores altos indican una que la mezcla tiene una mayor rigidez y un mejor comportamiento ante deformación permanente que mezclas con valores más bajos [142].

En las siguientes figuras se muestran los resultados de estabilidad, deformación y cociente Marshall obtenidos para cada una de las mezclas ensayadas.

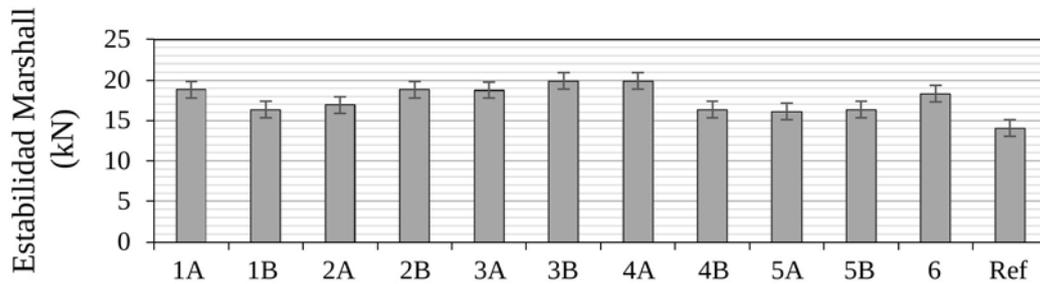


Figura 4-13. Resultados del ensayo Marshall. Estabilidad

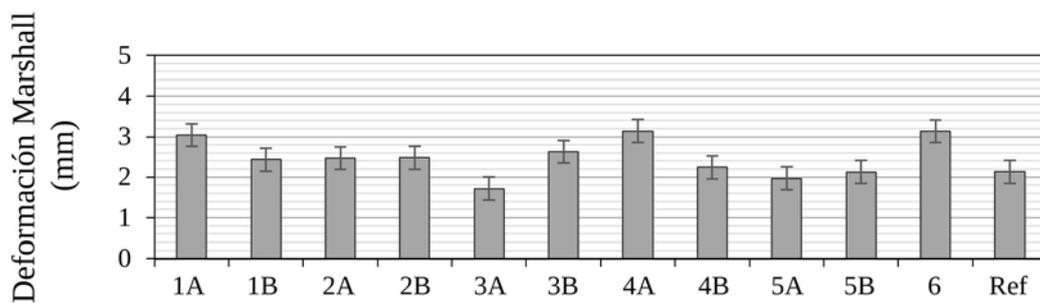


Figura 4-14. Resultados del ensayo Marshall. Deformación

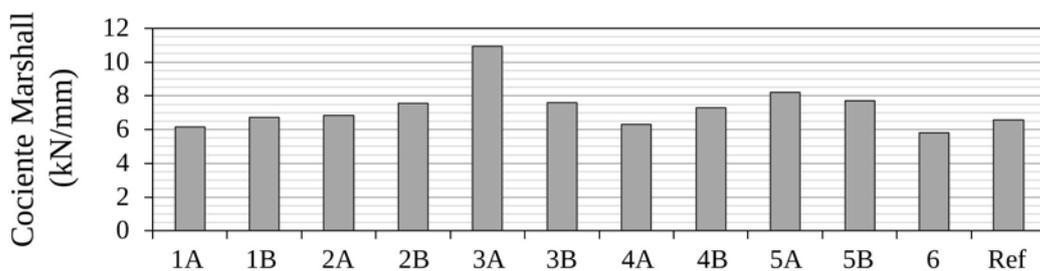


Figura 4-15. Resultados del ensayo Marshall. Cociente Marshall

De forma general, las mezclas experimentales muestran una estabilidad Marshall mayor a la de la mezcla de referencia, siendo esta última la mezcla con menor valor en este parámetro. Sin embargo, no existe ninguna tendencia clara en los valores de deformación, habiendo mezclas experimentales con valores mayores y menores al obtenido en la mezcla de referencia. Atendiendo a la normativa, la gran variabilidad en los resultados hace que se encuentren algunos valores por debajo y por encima del rango establecido (entre 2 y 3,5 mm), pero en cualquier caso todos ellos muy cercanos a dicho rango.

Estos resultados hacen, por tanto, que también exista cierta variabilidad en los valores de cociente Marshall obtenidos, sin que se aprecie ninguna tendencia clara. De esta forma, se han obtenido valores que oscilan en torno al valor mostrado por la mezcla de referencia. Mención aparte merece la mezcla 3A, la cual presenta un valor atípico, resultado de un valor de deformación también atípico si se compara con el resto de mezclas.

Por otra parte, comparando con el requisito recogido en el PG-4, relativo a mezclas con fresado, donde se indicaba que el valor del cociente Marshall no debe superar un valor de 8 kN/mm (mezclas con un contenido de fresado entre un 15% y el 60%), tenemos que todas las mezclas experimentales, a excepción de la ya comentada mezcla 3A, cumplirían con este requisito, denotando de esta manera que estos resultados pueden considerarse adecuados.

Por último, destacar que no es posible determinar ninguna tendencia clara que marque alguna diferencia entre el uso de un aditivo u otro. Comparando entre mezclas que comparten dosificación se encuentran diferencias en las mezclas número 1, 3 y 4. Exceptuando al par de mezclas número 1 debido a las diferencias en el contenido de huecos se puede ver como el uso del aditivo A resulta en mezclas con menor estabilidad y menor deformación en las mezclas número 3 que el uso del aditivo B, pero que este resultado se invierte en el caso de las mezclas número 4.

Esta incoherencia mostrada por las mezclas 3 y 4, unida a que en el resto de mezclas no se ha detectado diferencias significativas a nivel estadístico, hace que sea imposible atribuir ninguna de estas diferencias al uso de los aditivos. Ante este escenario, es difícil extraer alguna conclusión más allá de que las mezclas presentan un comportamiento adecuado, existiendo cierta variabilidad entre mezclas pero en todo caso mostrando todas con un comportamiento muy similar al de la mezcla de referencia.

#### *4.1.2.3. Sensibilidad al agua*

La resistencia al efecto negativo del agua es una propiedad muy importante en una mezcla bituminosa, especialmente en aquellas áreas donde la superficie de la carretera está sometida frecuentemente al efecto del agua o a múltiples ciclos de hielo-deshielo [143]. La susceptibilidad de una mezcla frente al efecto del agua está directamente relacionada con la durabilidad de la mezcla y da una indicación de la adhesividad existente entre áridos y ligante. En la Figura 4-16 se muestran los valores de resistencia a tracción indirecta (ITS) de cada uno de los grupos de probetas (secas y húmedas) y el porcentaje de resistencia conservada resultante (ITSR).

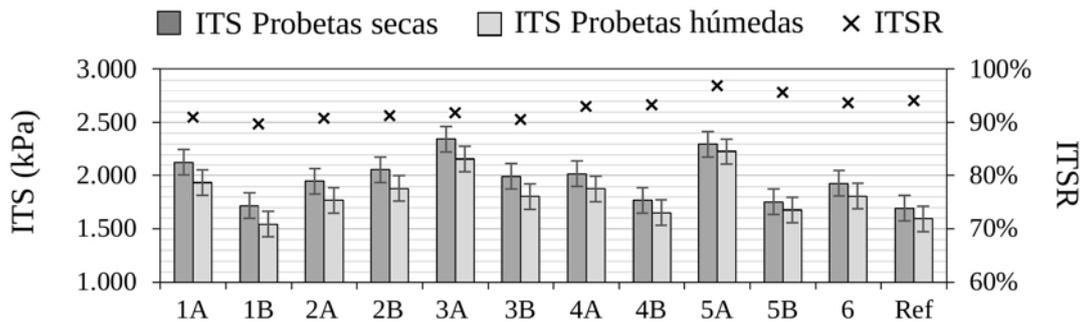


Figura 4-16. Resultados del ensayo de sensibilidad al agua

Los resultados muestran en primer lugar que todas las mezclas cumplen con el requisito establecido en el PG-3 ( $ITSR \geq 85\%$ ). Es por tanto posible establecer que la adhesividad entre los diferentes áridos y el ligante utilizado es buena. Además, de acuerdo con otras experiencias el uso de escoria negra también podría influenciar estos resultados, ayudando a incrementar tanto los valores de ITS como de ITSR, tal y como se recoge en el capítulo relativo al estado del arte [30,36,38,39,41,49]. Comparando con la mezcla de referencia, la cual muestra un valor de ITSR del 94,1%, las mezclas 1, 2 y 3 muestran un valor de ITSR ligeramente inferior, mientras que el resto de mezclas muestran valores similares o incluso superiores, como es el caso de la mezcla 5.

En relación con los valores ITS, existe cierta variabilidad entre mezclas, siendo difícil establecer ninguna tendencia clara. Sin embargo, como puede verse en la Figura 4-17, donde se comparan los valores de ITS en función del tipo de aditivo utilizado, las mezclas que utilizan el aditivo A presentan valores de ITS mayores que sus análogas con aditivo B. La única excepción la encontramos en la mezcla 2, donde las diferencias entre utilizar un aditivo u otro no son significativas estadísticamente. Estos resultados indican, por tanto, diferencias en la cohesión de las mezclas, probablemente relacionadas con la influencia de los aditivos sobre las propiedades y el grado homogeneidad del betún, y en particular, sobre la adhesividad de este con los áridos.

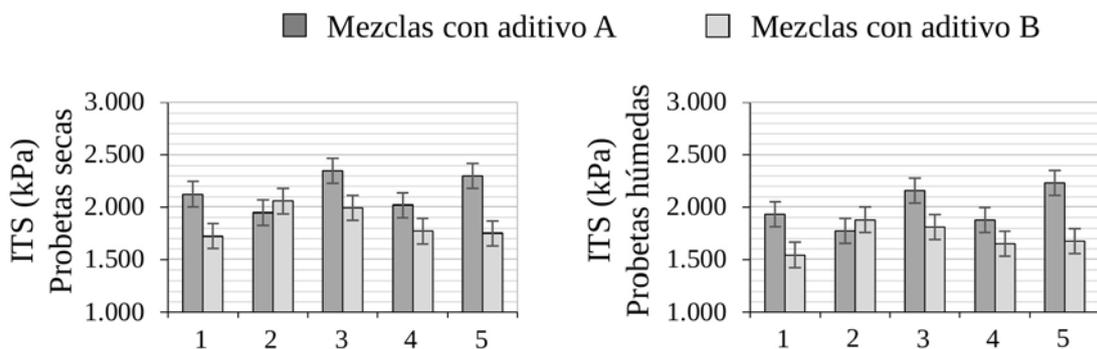


Figura 4-17. Resultados del ensayo de sensibilidad al agua. Valores de resistencia a tracción indirecta en función del tipo de aditivo utilizado

#### 4.1.2.4. Resistencia a la deformación permanente

La resistencia a la deformación permanente es una de las características más importantes de una mezcla para capa de rodadura, la cual debe soportar directamente el paso del tráfico. Los resultados obtenidos en el ensayo de rodadura se recogen en las Figuras 4-18 y 4-19. Como puede verse, todas las mezclas experimentales han mostrado un comportamiento excelente para este ensayo, todas ellas con valores inferiores al límite más restrictivo de los establecidos por el PG-3 para la pendiente de deformación media entre los ciclos 5.000 y 10.000 (0,07 mm/10<sup>3</sup> ciclos de carga).

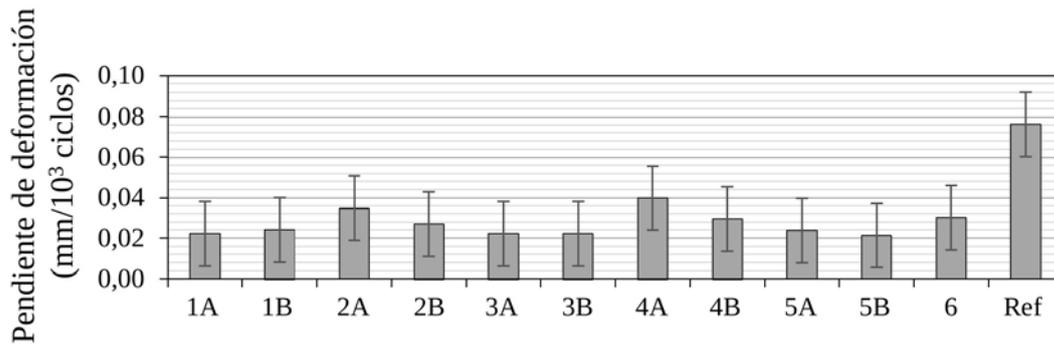


Figura 4-18. Resultados del ensayo de rodadura. Pendiente de deformación

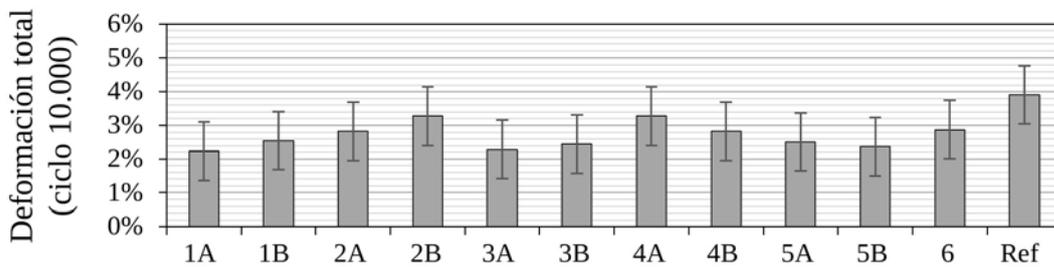


Figura 4-19. Resultados del ensayo de rodadura. Deformación total

Comparando entre las diferentes mezclas no se encuentran diferencias estadísticamente significativas entre ninguna de las mezclas experimentales, mostrando todas ellas unos resultados de pendiente de deformación significativamente mejores del mostrado por la mezcla de referencia. Volviendo sobre lo comentado en el capítulo del estado del arte, este mejor comportamiento parece encontrar su justificación tanto en el uso de escoria en la fracción gruesa del árido como en la incorporación de fresado en la composición de las mezclas [36,50,66,98].

En el caso de las mezclas que incorporan fresado, esta mayor resistencia a la deformación permanente se ve totalmente respaldada por los resultados obtenidos en el ensayo MSCR, los cuales ya anticipaban este mejor comportamiento. Sin embargo, las diferencias en la cantidad de fresado utilizada en cada una de las mezclas no llega a traducirse en una diferencia en los resultados.

Comparando entre las mezclas 1 y 2, ambas con similar composición pero con diferente contenido de fresado, puede verse cómo efectivamente un mayor contenido de fresado (mezcla 1) se traduce en mezclas con mejor resultado en este ensayo. Sin embargo, ocurre lo contrario si se realiza este mismo análisis con las mezclas 4 y 5, donde la mezcla 4, con mayor contenido de fresado, muestra peor resultado que la mezcla 5. Esto pone de manifiesto, por tanto, que el contenido de fresado no es la única variable que justifica estos resultados, y, como ya se ha comentado, el uso de escoria en la fracción gruesa también parece estar ejerciendo cierta influencia.

De hecho, la influencia de la escoria se pone de manifiesto en el resultado de la mezcla 6, la cual no incorpora fresado en su composición y, por tanto, su betún se compone exclusivamente por betún 50/70. En este caso, comparado con la mezcla de referencia, la presencia de escoria negra hace que el resultado del ensayo mejore sustancialmente, contrarrestando incluso el efecto negativo de utilizar una mayor cantidad de ligante. En este sentido, también merecen un comentario especial las mezclas número 3, en las que el uso de escoria LD en la fracción gruesa también contribuye al buen comportamiento de las mezclas en este ensayo.

### 4.1.3. Evaluación del comportamiento de la mezcla ante sollicitaciones dinámicas

#### 4.1.3.1. Selección de 4 mezclas para evaluar su comportamiento dinámico

Como se describe en la Sección 3.1.9.1, la selección de los dos pares de mezclas con mayor interés se realiza tomando como base una clasificación de las mezclas que tiene en cuenta el ensayo de rodadura, el de resistencia conservada en el ensayo de sensibilidad al agua y el contenido de ligante de aportación. En la Tabla 4-2 se recogen las puntuaciones asignadas a cada uno de los parámetros y la puntuación final obtenida.

Tabla 4-2. Puntuaciones asignadas a las mezclas.

Mezcla	WTS <sub>AIRE</sub> (mm/10 <sup>3</sup> ciclos)		ITSR (%)		Ligante de aportación (% v/v)		P <sub>TOTAL</sub>
	Resultado	P <sub>1</sub>	Resultado	P <sub>2</sub>	Resultado	P <sub>3</sub>	
1A	0.02	0.80	91.0	0.40	8.5	0.66	0.61
1B	0.02	0.80	89.8	0.32	8.4	0.67	0.58
2A	0.03	0.70	90.8	0.39	10.5	0.46	0.53
2B	0.03	0.70	91.3	0.42	10.5	0.46	0.54
3A	0.02	0.80	91.9	0.46	9.7	0.54	0.61
3B	0.02	0.80	90.6	0.37	9.7	0.54	0.58
4A	0.04	0.60	93.1	0.54	6.3	0.89	0.63
4B	0.03	0.70	93.4	0.56	6.3	0.89	0.68
5A	0.02	0.80	97.0	0.80	7.6	0.76	0.79
5B	0.02	0.80	95.7	0.71	7.5	0.76	0.76
6	0.03	0.70	93.7	0.58	13.6	0.15	0.54
REF	0.08	0.20	94.1	0.61	10.5	0.46	0.42

Ordenando las mezclas por puntuación (Figura 4-20) es posible ver de una forma más clara el orden final de las mismas.

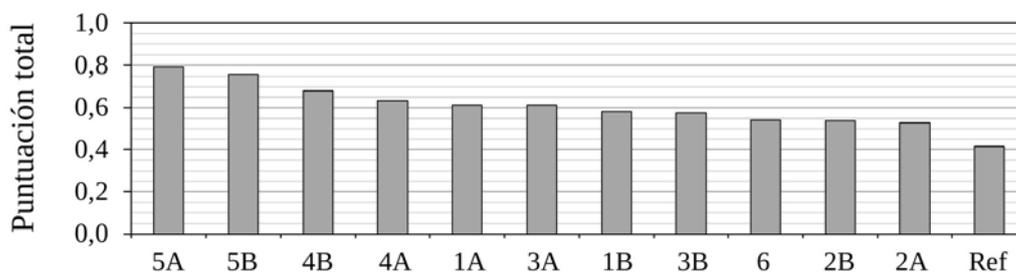


Figura 4-20. Clasificación de las mezclas según la puntuación asignada

En primer lugar es necesario destacar que la mezcla de referencia es la mezcla con menor puntuación de todas. En cierta medida este resultado es lógico ya que es la mezcla con peor resultado en el ensayo de rodadura, con un resultado considerablemente peor al de las mezclas experimentales. En cualquier caso, una puntuación baja no significa un mal comportamiento, de hecho, cómo hemos visto en todos los ensayos, la mezcla de referencia cumple los requisitos más restrictivos del actual PG-3.

En cuanto a las mezclas experimentales, el par de mezclas número 5 son las dos mezclas con mejor puntuación. Estas mezclas presentan un excelente resultado tanto en el ensayo de rodadura como en el ensayo de sensibilidad al agua, y además, la aportación del fresado al contenido total de betún hace que su contenido de betún de aportación sea menor al de la mezcla de referencia. Seguido de esta mezcla están las mezclas número 4, también con buenos resultados en los ensayos y con poca cantidad de betún 50/70 de aportación utilizado. A partir de aquí, están los pares de mezclas número 1 y número 3, ambas con buen comportamiento en el ensayo de rodadura pero un resultado más discreto en el ensayo de sensibilidad al agua y con mayor contenido de betún 50/70 que las mezclas 4 y 5. En último lugar están las mezclas número 2 y la mezcla 6, relegadas hasta estas posiciones debido principalmente a la mayor cantidad de betún 50/70 utilizado.

A la vista de esta clasificación, el primer par de mezclas seleccionado es el par de mezclas número 5, las cuales han obtenido la mayor puntuación. El otro par de mezclas seleccionado son las mezclas número 1, las cuales, pese a haber obtenido una puntuación intermedia, suscitan especial interés debido a su composición, ya que están compuestas por un 97,8% de áridos alternativos, con una tasa considerablemente alta de material fresado.

#### 4.1.3.2. Rigidez

Los valores de módulo dinámico y ángulo de fase obtenidos para cada una de las mezclas a diferentes frecuencias de ensayo se muestran en las Figuras 4-21 y 4-22.

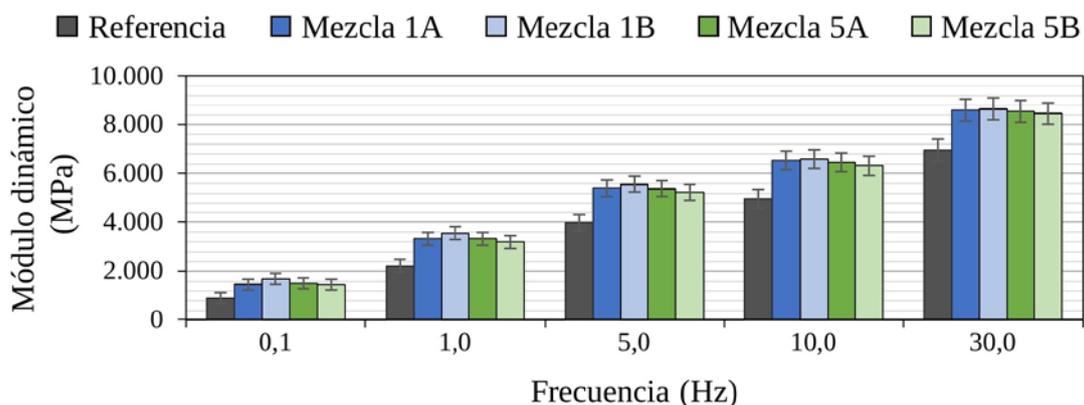


Figura 4-21. Resultados del ensayo de rigidez. Valores de módulo dinámico

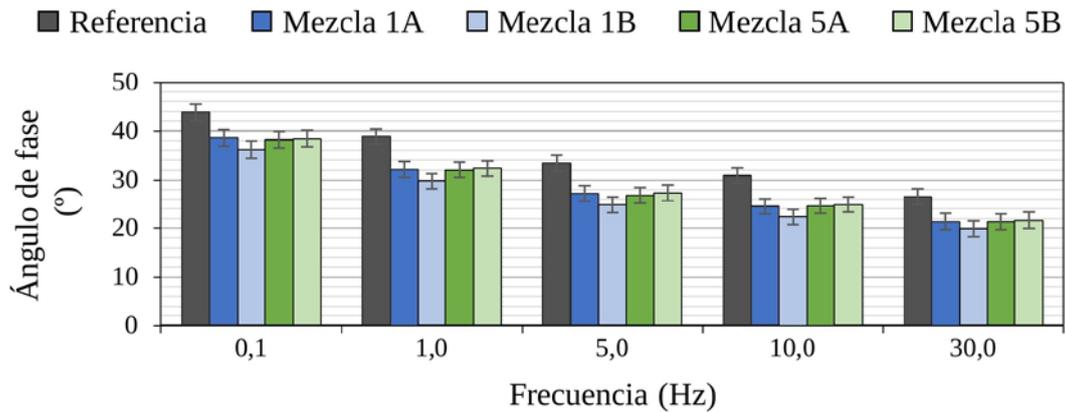


Figura 4-22. Resultados del ensayo de rigidez. Valores de ángulo de fase

En estos resultados las mezclas experimentales muestran todas ellas un valor tanto de rigidez como de ángulo de fase similar entre sí, sin diferencias significativas entre ellas. Comparando con la mezcla de referencia, se puede ver cómo la rigidez es superior en las mezclas experimentales. Este incremento en la rigidez es mayor a frecuencias bajas, incrementándose en torno a un 60-90% respecto del valor de la mezcla de referencia. A las frecuencias más altas de ensayo este incremento se sitúa en torno a un 20-30%.

De acuerdo con las diferentes experiencias analizadas a este respecto en el estado del arte, esta mayor rigidez podría atribuirse inicialmente a la presencia de fresado en la mezcla [85,86,92], y en efecto, esta parece ser una de las razones si se atiende a los resultados de módulo complejo y ángulo de fase obtenidos para las muestras de betún previamente analizados (sección 4.1.1.1.), los cuales ya pronosticaban esta mayor rigidez. En este caso, pese que el ratio de betún reciclado respecto del betún total no alcanza a suponer un 40% como así ocurría en las muestras de betún, quedándose en un 31,5% para las mezclas 1 y en un 24,0% para las mezclas 5, su influencia sí parece ser suficiente como para provocar un cierto incremento en la rigidez de la mezcla.

Sin embargo, el incremento en la rigidez de la mezcla también podría encontrar parte de su justificación en la utilización de escoria. Recurriendo de nuevo a la bibliografía es posible destacar diferentes estudios donde los autores manifiestan que el uso de escoria negra provoca un aumento en la rigidez de la mezcla [25,28,36-41,44,49], atribuyendo dicho aumento a la mayor rugosidad y angulosidad de este material. De esta forma, el incremento de rigidez mostrado por las mezclas experimentales podría atribuirse también a la utilización de escoria negra.

Por último, es preciso destacar que la mayor cantidad de ligante total utilizada en las mezclas número 1, así como el mayor ratio de betún aportado por el fresado de estas, no parecen tener una influencia notable en los resultados de rigidez, mostrando unos valores ligeramente superiores a los mostrados por las mezclas 5 pero sin que esa diferencia llegue a ser estadísticamente significativa. Las diferencias entre estas mezclas sí son un poco más grandes en los valores de ángulo de fase, con valores más pequeños en las mezclas número 1, sin que tampoco sean estas diferencias significativas estadísticamente.

#### 4.1.3.3. Resistencia a la fatiga

Determinada la rigidez de las mezclas, se da paso al análisis de su comportamiento en el ensayo de fatiga. En la Tabla 4-3 se recogen, como indicadores ampliamente aceptados del comportamiento a fatiga, los valores de deformación característica (deformación que provoca la rotura con un millón de ciclos) y el parámetro  $N_{100}$  (número de ciclos hasta el fallo asociados a una deformación de 100  $\mu\text{m}/\text{m}$ ). En esta tabla también se recoge la ley de fatiga y el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) asociado a cada una de las mezclas

Tabla 4-3. Resultados del ensayo de fatiga

Mezcla	$\epsilon_{\text{característica}}$	$N_{100} (\times 10^6)$	Ley de fatiga	$R^2$
1A	130,8 $\mu\text{m}/\text{m}$	4,15	$\ln(N) = 39,658 - 5,303 \times \ln(\epsilon)$	0,76
1B	148,3 $\mu\text{m}/\text{m}$	1,60	$\ln(N) = 49,029 - 7,044 \times \ln(\epsilon)$	0,86
5A	142,5 $\mu\text{m}/\text{m}$	8,10	$\ln(N) = 43,100 - 5,905 \times \ln(\epsilon)$	0,87
5B	120,0 $\mu\text{m}/\text{m}$	2,69	$\ln(N) = 39,764 - 5,420 \times \ln(\epsilon)$	0,87
Referencia	154,5 $\mu\text{m}/\text{m}$	2,08	$\ln(N) = 48,972 - 6,976 \times \ln(\epsilon)$	0,95

De estos resultados la conclusión más inmediata es que, atendiendo exclusivamente al valor de los parámetros de deformación característica y  $N_{100}$ , todas las mezclas experimentales muestran un resultado peor en comparación con la mezcla de referencia. Es interesante destacar de esta tabla los valores del parámetro  $R^2$ , los cuales muestran que en las mezclas experimentales la correlación no es tan buena como lo es en la mezcla de referencia. Esto es un claro reflejo de la variabilidad introducida por el fresado, material heterogéneo por naturaleza.

Para tener una idea más clara de cómo evoluciona el comportamiento a fatiga de las mezclas en función de la deformación aplicada, dado que estos parámetros solo reflejan el resultado en dos puntos de la curva, en la Figura 4-23 se han representado las curvas de fatiga donde se puede ver el número de ciclos hasta fallo asociado a distintos niveles de deformación (rango de deformaciones abarcado en el ensayo).

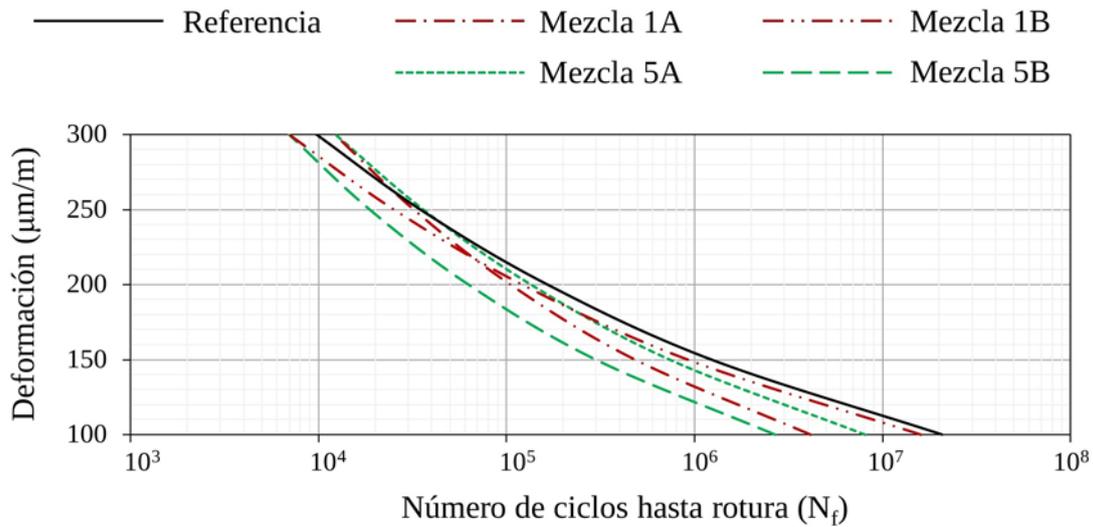


Figura 4-23. Resultados del ensayo de fatiga. Curvas de fatiga

Analizando las curvas de fatiga se puede ver cómo el comportamiento de algunas mezclas evoluciona de distinta forma, a medida que varía la deformación, a cómo lo hace la mezcla de referencia. Las mezclas 1A y 5A presentan un buen comportamiento cuando la deformación es alta ( $>250 \mu\text{m/m}$ ), soportando incluso más ciclos que la mezcla de referencia. Sin embargo, a medida que se reduce la deformación, estas mezclas van empeorando su comportamiento, aguantando cada vez menos ciclos que la mezcla de referencia.

Este comportamiento es más acusado en la mezcla 1A, mostrando cada vez peor resultado que la mezcla 5A. Por otra parte, las mezclas 1B y 5B presentan un resultado sensiblemente paralelo al de la mezcla de referencia, soportando siempre menos ciclos de carga que esta. En este caso, la mezcla 5B es la que reduce de una forma más acusada su rendimiento, mostrando a bajas deformaciones peor resultado que la mezcla 1B.

Pese a que con este análisis ya es posible identificar el comportamiento general en términos de fatiga, para tener una idea más clara de lo que suponen las diferencias entre mezclas, se ha representado en la Figura 4-24, para distintas deformaciones, el número de ciclos que soporta cada mezcla como el porcentaje que supone del número de ciclos que soporta la mezcla de referencia ( $N_{f_{\text{Experimental}}} / N_{f_{\text{Referencia}}}$ ).

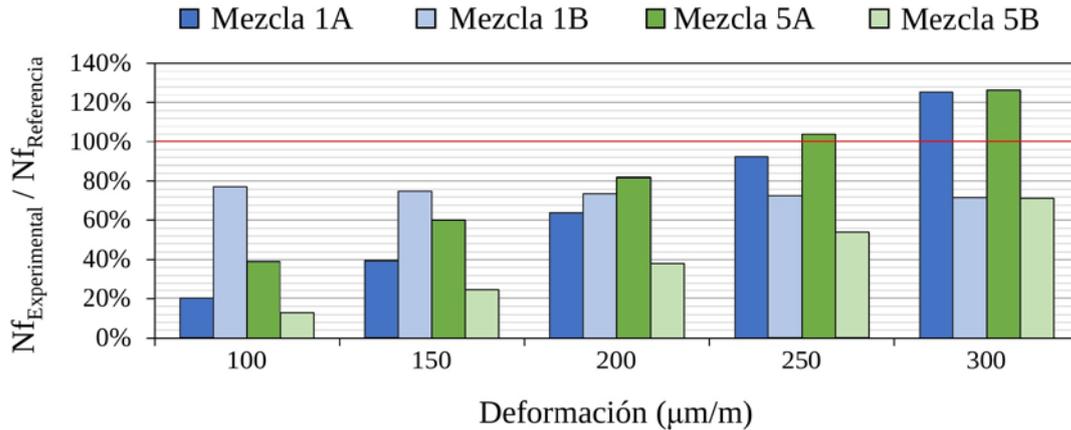


Figura 4-24. Resultados del ensayo de fatiga. Ratio de ciclos hasta rotura respecto de la mezcla de referencia

Mediante esta representación es posible ver cómo, en algunos casos, existen grandes diferencias entre mezclas. Esto es especialmente acusado a deformaciones bajas, donde las diferencias entre las mezclas son considerablemente grandes. Con 100 µm/m de deformación, las mezclas 1A y 5A soportan menos del 20% de los ciclos soportados por la mezcla de referencia. La mezcla 5B mejora este resultado, soportando un 40% de dichos ciclos, y la mezcla con mejor comportamiento es por tanto la mezcla 1B, elevando ese porcentaje hasta el 77%.

Es destacable la evolución de las mezclas 1A y 5A, las cuales elevan ese porcentaje a medida que aumenta la deformación impuesta de forma que, cuando la deformación alcanza los 250 µm/m, estas mezclas son capaces de aguantar un número de ciclos similar al de la mezcla de referencia. A partir de ese valor de deformación, su rendimiento sigue mejorando por encima del rendimiento de dicha mezcla de referencia.

Por su parte, la mezcla 5B también muestra una mejoría en su comportamiento a medida que aumenta la deformación, alcanzado un porcentaje del 54% cuando la deformación alcanza los 250 µm/m. Por último, la mezcla 1B es la única mezcla que mantiene una proporción constante a todas las deformaciones, cercana siempre al 75% de los ciclos soportados por la mezcla de referencia.

Comparando estos resultados con los resultados obtenidos para el ensayo *Linear Amplitude Sweep* (LAS) ejecutado sobre las muestras de betún, vemos como los obtenidos en las mezclas no son tan buenos como parecían indicar los resultados en ese ensayo donde, muestras con un ratio de betún reciclado del 40% (mayor al de estas mezclas) mostraban un comportamiento similar al del betún 50/70 cuando se utilizaba el aditivo B, y mejoraban ese comportamiento cuando se utilizaba el aditivo A.

En este sentido, para las deformaciones más altas de ensayo los resultados de las mezclas sí parecen ajustarse a lo mostrado en los betunes, teniendo mejor comportamiento cuando se utiliza el aditivo A. Cuando la deformación impuesta alcanza valores entre 250 y 300  $\mu\text{m}/\text{m}$ , las dos mezclas con aditivo A alcanzan y superan en número de ciclos soportados a la mezcla de referencia, de la misma forma que ocurría en las muestras de betún. Por su parte, para ese mismo rango de deformaciones, las mezclas con aditivo B se quedan por debajo de la mezcla de referencia en número de ciclos, mostrando en este caso un comportamiento peor del que pronosticaban los resultados sobre el betún.

Otro aspecto que es necesario destacar es la dificultad de valorar la influencia del contenido de betún, al no existir ninguna tendencia clara que marque diferencias entre las mezclas 1 (con más betún) y las mezclas 5. Al igual que ocurría en el ensayo de rigidez, el mayor contenido de betún de las mezclas 1 no parece tener consecuencias positivas para la mezcla, haciendo pensar en que, debido a la mayor absorción ya comentada de la arena de moldeo frente a la arena caliza, el contenido de ligante efectivo en la mezcla pueda estar en niveles cercanos al de las mezclas número 5.

En este punto, visto el comportamiento de las mezclas en el ensayo de fatiga, es necesario considerar el comportamiento en la situación real de servicio. Para ello, en primer lugar es necesario recalcar que este ensayo ha sido ejecutado en control de desplazamiento de forma que, fijada la amplitud de desplazamiento, se observa la variación de la carga aplicada. Para este caso particular, donde existen diferencias significativas en la rigidez de las mezclas, este ensayo no es del todo apropiado ya que, a igualdad de deformación, las mezclas experimentales (más rígidas) van a estar sujetas a mayores cargas que la mezcla de referencia.

Llevado a una situación real de servicio donde ambas mezclas van a estar sujetas a las mismas cargas de tráfico, la respuesta a nivel de tensiones y deformaciones de la mezcla no tiene por qué coincidir, estando condicionada directamente por la rigidez del pavimento pudiendo, en algunos casos, jugar a favor de la mezcla experimental [93-95].

Una situación que se presenta muy favorable para la utilización de estas mezclas experimentales sería, por ejemplo, en climas cálidos con tráficos lentos. En esta situación, la mayor rigidez de las mezclas experimentales haría que las deformaciones, aun siendo grandes, no lo sean tanto como las de una mezcla convencional. Esto haría que el comportamiento a fatiga mejorara, no solo porque las deformaciones son menores a las de la mezcla de referencia, sino también porque como se ha visto, el comportamiento de estas mezclas mejora a deformaciones altas. Todo esto teniendo en cuenta que el comportamiento ante el fallo por deformación permanente también es mayor en las mezclas experimentales.

#### 4.1.4. Estudio de la reciclabilidad de las mezclas desarrolladas

Vistas y analizadas las diferentes mezclas bituminosas, en este apartado se muestran los resultados del estudio de reciclabilidad llevado a cabo. Como se indicaba en el capítulo anterior, este estudio se ha ejecutado a partir de las mezclas 1A y 1B, comenzando con el envejecimiento acelerado de las mismas para, de esta forma, generar un fresado artificial que pueda ser utilizado en el diseño de nuevas mezclas.

Estas mezclas resultarán por tanto en un fresado con un contenido de betún total del 4,6% de su peso (12,4% v/v). Recordar que el fresado que originalmente utilizaba esta mezcla aportaba un 31,4% del total del betún y un 40,2% del volumen de los áridos. El betún restante se corresponde con un betún convencional 50/70 y la fracción gruesa y fina de los áridos se completaba con escoria negra (43,2% del volumen) y arena de moldeo (14,4% del volumen) respectivamente.

El proceso de envejecimiento de la mezcla, como se indica en el capítulo anterior, cuenta con dos fases: envejecimiento a corto plazo (STOA) y envejecimiento a largo plazo (LTOA). El cambio sufrido por las características del betún de las mezclas 1A y 1B durante este proceso ha sido evaluado a través de los resultados del ensayo de penetración y del ensayo de anillo y bola.

Así, el betún de la mezcla 1A reduce su valor de penetración desde  $39 \text{ mm}^{-1}$ , previo al envejecimiento a corto plazo, hasta  $21 \text{ mm}^{-1}$ , una vez finalizado el proceso de envejecimiento a largo plazo. En cuanto a la temperatura de reblandecimiento, esta se incrementa por el efecto del envejecimiento desde los  $55,4^\circ\text{C}$  hasta los  $65,2^\circ\text{C}$ . Por su parte, el betún contenido en la mezcla 1B, tras el proceso de envejecimiento, reduce su valor de penetración desde  $35 \text{ mm}^{-1}$  hasta  $26 \text{ mm}^{-1}$ , e incrementa su temperatura de reblandecimiento desde  $55,2^\circ\text{C}$  hasta  $70,1^\circ\text{C}$ .

Una vez realizado el envejecimiento, estas mezclas ya están en disposición de ser utilizadas a modo de fresado en la elaboración de las mezclas bituminosas descritas en la [Sección 3.1.10](#). Sin embargo, previamente se ha decidido valorar la posibilidad de incrementar la cantidad de aditivo a utilizar con respecto a la utilizada en las mezclas anteriormente desarrolladas.

En este sentido, visto que las mezclas experimentales tienen mayor rigidez que la mezcla de referencia y con la intención de mejorar el comportamiento a fatiga, se decidió, en coordinación con el resto de socios del proyecto AlterPave, incrementar la cantidad de aditivo a una dosis del 5% del peso del betún aportado por el fresado.

#### 4.1.4.1 Contenido de huecos

Utilizando la dosis de aditivo seleccionada, se han elaborado las dos mezclas bituminosas descritas en la Sección 3.1.10 (en adelante, mezcla 1Ar y 1Br). El contenido de betún de estas mezclas se muestra en la Figura 4-22, junto con el contenido de la mezcla de referencia y de las dos mezclas originales sobre las que basan su composición (mezclas 1A y 1B).

Destaca que las mezclas recicladas requieren menor cantidad de ligante que las mezclas originales, teniendo en cuenta que estas mezclas también incorporan arena de moldeo en su composición, y de hecho, en mayor cantidad que las mezclas originales. De hecho, estas mezclas tienen uno de los mayores ratios de betún reciclado de todas las mezclas, con un porcentaje del 41%, el cual está compuesto en un 30% por betún proveniente del fresado originalmente utilizado, y por tanto, que ha sido sometido a dos ciclos de envejecimiento, uno natural y otro artificial en laboratorio.

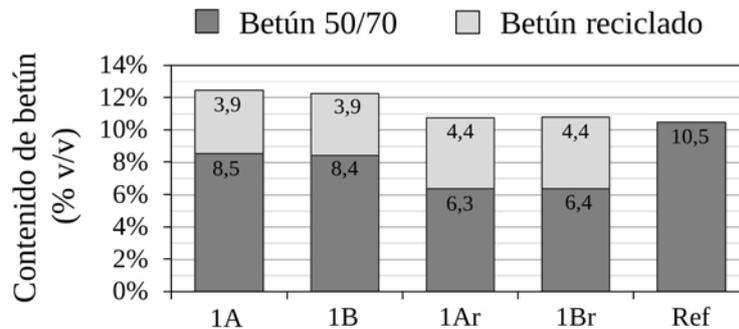


Figura 4-25. Contenido de ligante de las mezclas bituminosas (estudio de reciclabilidad)

Corresponden a estas cantidades de betún las propiedades volumétricas que se muestran en la Figura 4-26.

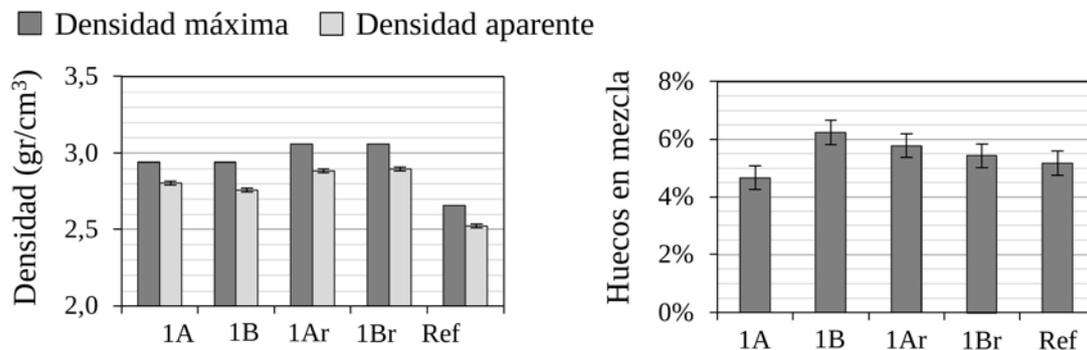


Figura 4-26. Propiedades volumétricas de las mezclas bituminosas (estudio de reciclabilidad)

El volumen de huecos se sitúa en valores adecuados para ambas mezclas, ligeramente superiores al de la mezcla de referencia. En cuanto a la densidad, destacar el incremento que supone la utilización de un fresado, cuya densidad ya era alta, en combinación con la escoria negra. En este sentido, es necesario tener en consideración que el uso de este tipo de mezclas provoca que, una vez estas han alcanzado el final de su vida útil, resulten en un fresado más denso, con las consiguientes afecciones que esto tiene sobre los procesos de demolición, transporte y posteriores usos.

#### 4.1.4.2. Ensayo Marshall

La Figura 4-27 recoge los resultados del ensayo Marshall de las mezclas recicladas.

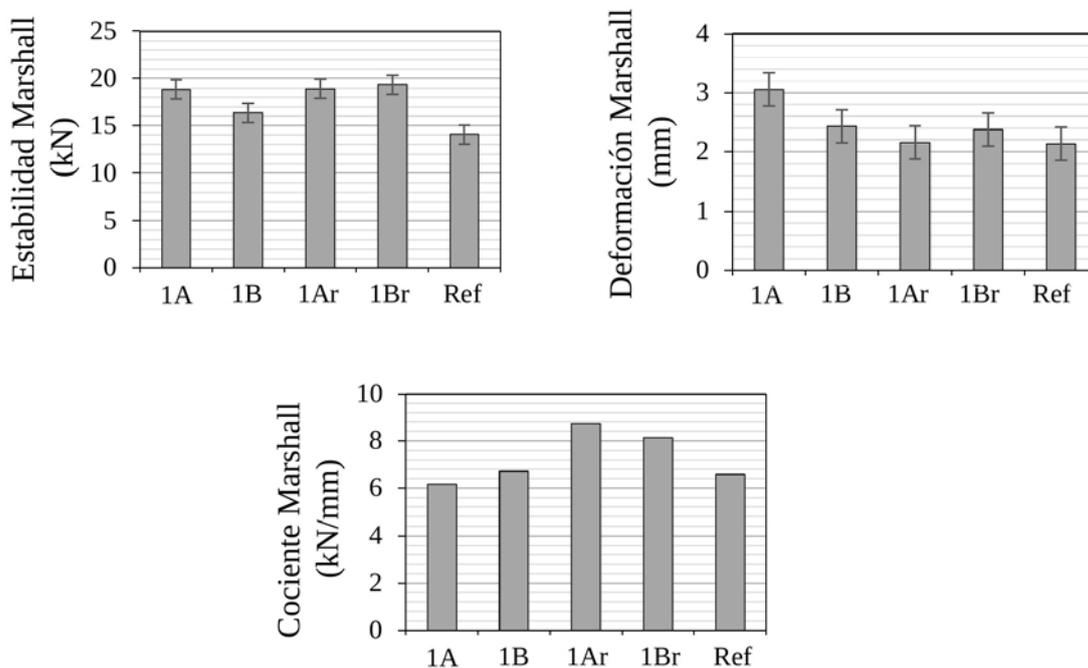


Figura 4-27. Resultados del ensayo Marshall (estudio de reciclabilidad)

De estos resultados es posible destacar en primer lugar que ambas mezclas recicladas han mostrado un comportamiento muy similar tanto en los valores de deformación como en los valores de estabilidad, sin que las diferencias entre ambas sean estadísticamente significativas. En ambos casos, la estabilidad toma valores mayores al resultado de la mezcla de referencia, mientras que los valores de deformación se mantienen en un valor próximo al de esta, denotando por tanto una mayor rigidez.

Los valores más altos de cociente Marshall contradicen en cierta medida al hecho de haber aumentado la cantidad de rejuvenecedor. Sin embargo, la menor cantidad de ligante utilizado en estas mezclas puede ser la principal razón que justifique este comportamiento. En cualquier caso, tanto la rigidez como el comportamiento ante deformación permanente han sido evaluados posteriormente mediante ensayos específicos.

#### 4.1.4.3. Sensibilidad al agua

En la Figura 4-28 se muestran los resultados obtenidos para el ensayo de sensibilidad al agua.

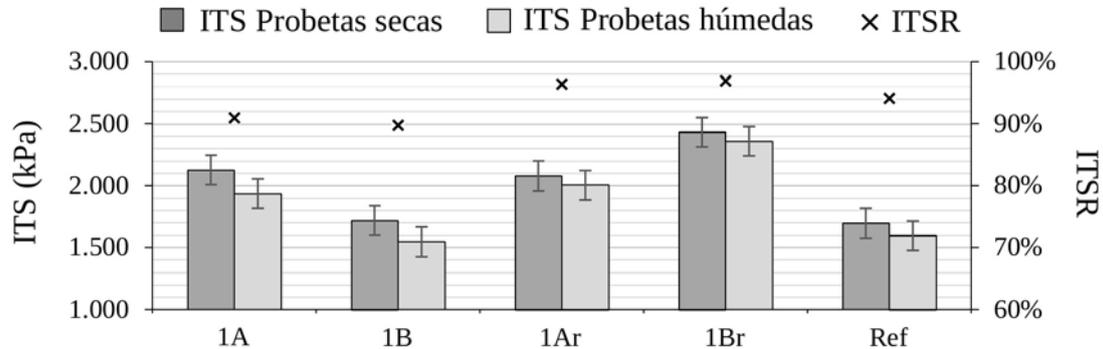


Figura 4-28. Resultados del ensayo de sensibilidad al agua (estudio de reciclabilidad)

Las mezclas recicladas, en línea con las mezclas originales, han mostrado un excelente comportamiento en el ensayo de sensibilidad al agua. Como puede verse en la figura, ambas mezclas han mostrado unos valores de ITS muy altos, mayores incluso que sus análogos originales. En cuanto a los valores de ITSR, ambas mezclas toman valores por encima del 96%, situándose junto con la mezcla 5B como las mezclas que mejor resultado han obtenido en este ensayo. Estos resultados confirman la buena adhesividad que existe entre los materiales utilizados y el betún.

Sin embargo, en este caso se rompe la tendencia observada en las mezclas originales, donde las mezclas que utilizan el aditivo A tendían a presentar mayores valores de ITS. En este caso, la mezcla con aditivo B es la que presenta mayor valor de ITS, tanto en las probetas secas como en las húmedas, contradiciendo en cierta medida al análisis realizado para las mezclas originales.

#### 4.1.4.4. Resistencia a la deformación permanente

En el caso del ensayo de rodadura, como puede verse en la Figura 4-29, el incremento en la cantidad de aditivo sí parece haber influenciado en la forma que se esperaba, mostrando las mezclas recicladas un rendimiento ligeramente inferior al mostrado por las mezclas originales. Esto se aprecia especialmente en los valores de deformación total tras el ensayo, donde las mezclas recicladas alcanzan valores significativamente superiores a los mostrados por las mezclas originales. De hecho, se puede ver cómo la mezcla 1Ar alcanza un valor similar a la mezcla de referencia y la mezcla 1Br lo supera.

Sin embargo, las mezclas recicladas muestran un resultado muy bueno en términos de pendiente de deformación, ligeramente superior al de las mezclas originales pero sin diferencias significativas a nivel estadístico. A este respecto, es necesario considerar también que la mayor proporción de escoria negra utilizada en las mezclas recicladas (el fresado aporta escoria negra), y la menor cantidad de betún de estas con respecto de las mezclas originales, son dos factores que tienen un efecto positivo sobre el comportamiento de las mezclas en este ensayo, contrarrestando la posible afección negativa provocada por el incremento en la cantidad de aditivo.

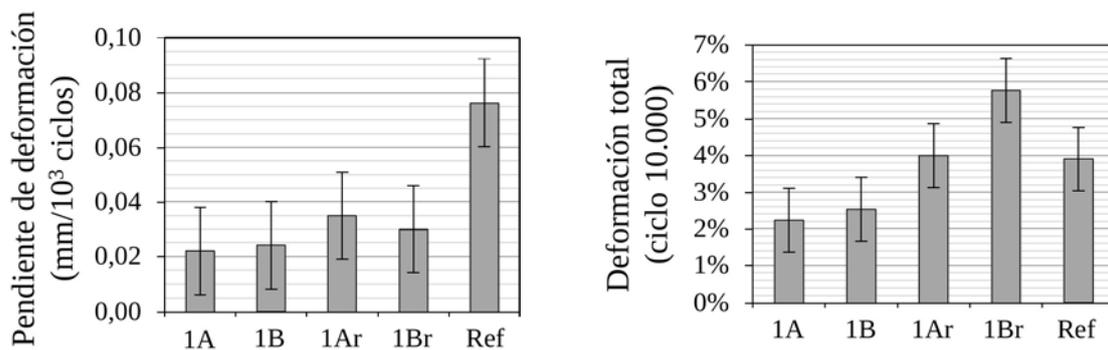


Figura 4-29. Resultados del ensayo de rodadura (estudio de reciclabilidad)

#### 4.1.4.5. Rigidez

Los valores de módulo dinámico y ángulo de fase obtenidos para cada una de las mezclas a diferentes frecuencias de ensayo se muestran en las Figuras 4-30 y 4-31.

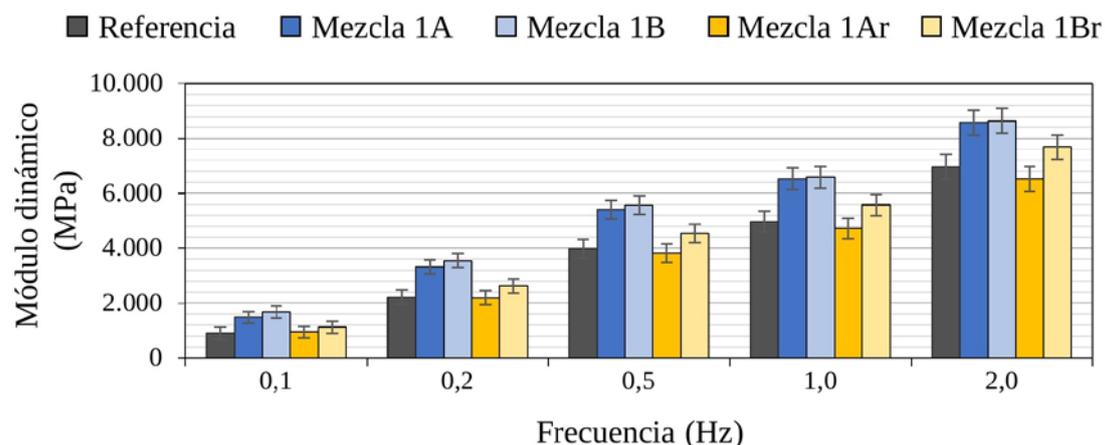


Figura 4-30. Resultados del ensayo de rigidez. Valores de módulo dinámico (estudio de reciclabilidad)

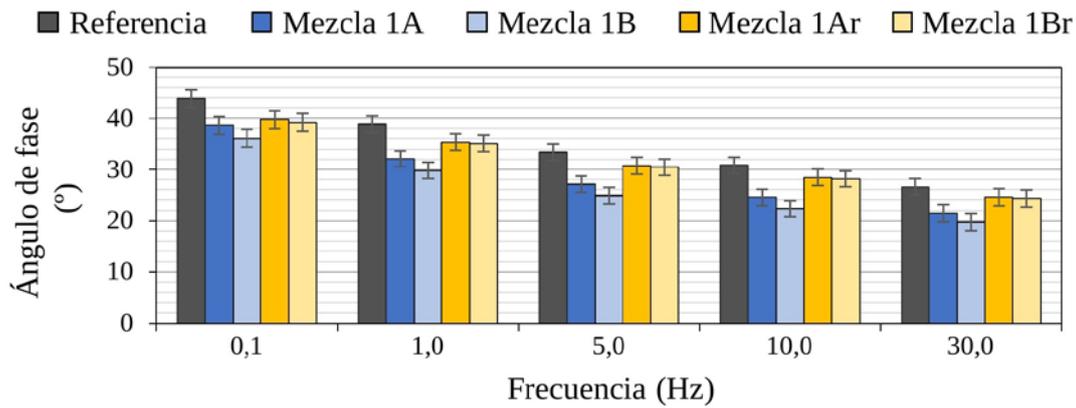


Figura 4-31. Resultados del ensayo de rigidez. Valores de ángulo de fase (estudio de reciclabilidad)

Como puede verse en la Figura 4-30, las mezclas recicladas muestran valores de rigidez menores que los mostrados por las mezclas originales, y muy próximos a los valores de la mezcla de referencia. Estos resultados son bastante sorprendentes vistos los resultados en ensayos anteriores, donde tanto el cociente Marshall como la buena resistencia a deformación permanente hacían pensar en mezclas con una rigidez más alta que la de la mezcla de referencia.

De nuevo, son las propiedades del betún las que deberían justificar este comportamiento, teniendo en cuenta que además, la cantidad total es menor. Por supuesto, el incremento en la cantidad de aditivo parece haber influido en estos resultados, pero también la diferencia entre las características de los betunes aportados por los fresados puede ser otra de las razones, especialmente en este caso, donde el fresado ha sido generado artificialmente en laboratorio,

#### 4.1.4.6. Resistencia a la fatiga

En la Tabla 4-4 se recogen los principales parámetros calculados a partir del ensayo de fatiga y la ley de fatiga asociada a cada una de las mezclas. Analizando estos indicadores es posible concluir que las mezclas recicladas, contrariamente a lo esperado, presentan peor comportamiento a fatiga que las mezclas originales, y muy por debajo del rendimiento de la mezcla de referencia.

Tabla 4-4. Resultados del ensayo de fatiga. Estudio de reciclabilidad

Mezcla	$\epsilon_{\text{Característica}}$	$N_{100}$	Ley de fatiga	$R^2$
1A	130,8 $\mu\text{m/m}$	4,15E+06	$\ln(N) = 39,658 - 5,303 \times \ln(\epsilon)$	0,76
1B	148,3 $\mu\text{m/m}$	1,60E+07	$\ln(N) = 49,029 - 7,044 \times \ln(\epsilon)$	0,86
1Ar	120,3 $\mu\text{m/m}$	3,01E+06	$\ln(N) = 42,422 - 5,972 \times \ln(\epsilon)$	0,87
1Br	114,3 $\mu\text{m/m}$	1,90E+06	$\ln(N) = 36,690 - 4,827 \times \ln(\epsilon)$	0,97
Referencia	154,5 $\mu\text{m/m}$	2,08E+07	$\ln(N) = 48,972 - 6,976 \times \ln(\epsilon)$	0,95

Representando la curva de fatiga (Figura 4-32) se muestra cómo prácticamente a todos los niveles de deformación, las mezclas recicladas soportan menos ciclos de carga que las mezclas originales y que la mezcla de referencia. En el caso particular de la mezcla 1Br, la resistencia a fatiga a deformaciones bajas (100  $\mu\text{m/m}$ ) es la peor de todas las mezclas; sin embargo, su comportamiento mejora a medida que la deformación es mayor, alcanzando un rendimiento similar al de la mezcla de referencia cuando la deformación alcanza los 300  $\mu\text{m/m}$ . Por su parte, la mezcla 1Ar no logra alcanzar un rendimiento similar al de la mezcla de referencia a ningún nivel de deformación, si bien es cierto que a deformaciones bajas (<150  $\mu\text{m/m}$ ) esta mezcla presenta mejor comportamiento a fatiga que la mezcla reciclada 1B.

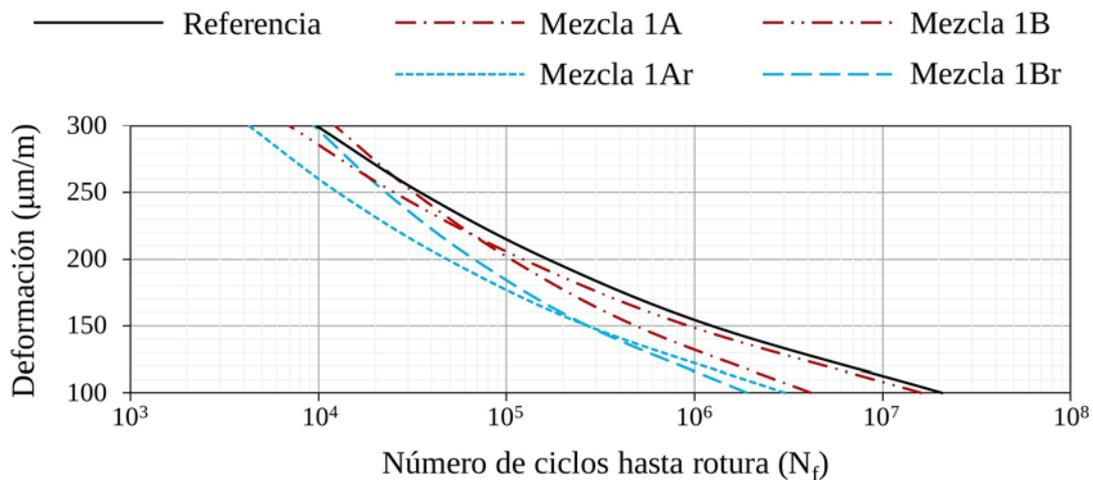


Figura 4-32. Resultados del ensayo de fatiga. Curvas de fatiga (estudio de reciclabilidad)

Al igual que se hiciera con las mezclas originales, en la Figura 4-33 se ha representado la vida útil a fatiga para los distintos niveles de deformación expresada como el porcentaje de ciclos respecto de los ciclos asociados a la mezcla de referencia ( $N_{f_{\text{Experimental}}} / N_{f_{\text{Referencia}}}$ ).

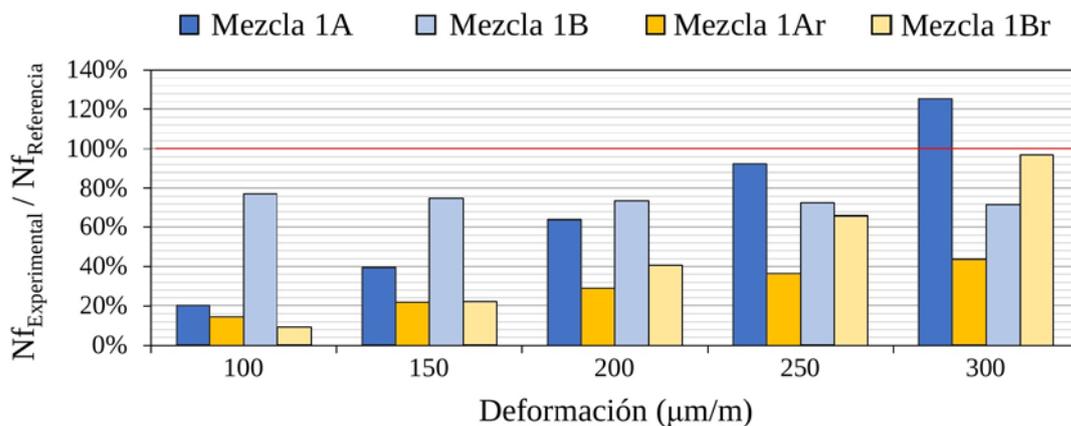


Figura 4-33. Resultados del ensayo de fatiga. Ratio de ciclos hasta rotura respecto de la mezcla de referencia (estudio de reciclabilidad)

Mediante esta representación es posible ver claramente cómo el rendimiento a deformaciones bajas de las mezclas recicladas es muy inferior al de la mezcla de referencia, e incluso inferior al mostrado por las mezclas originales (que ya era muy bajo en el caso de la mezcla 1A), mostrando un número de ciclos hasta rotura inferior al 15% de los ciclos soportados por la mezcla de referencia.

Este resultado mejora a media que la deformación va creciendo, especialmente en la mezcla 1Br, la cual es capaz de resistir el mismo número de ciclos que la mezcla de referencia cuando la deformación impuesta supera los 300  $\mu\text{m/m}$ , superando el número de ciclos soportados por la mezcla original 1B.

Sin embargo, pese a producirse también un incremento, este no es tan grande en la mezcla 1Ar, la cual a 300  $\mu\text{m/m}$  de deformación impuesta, solamente alcanza poco más del 40% de los ciclos soportados por la mezcla de referencia. Este resultado, además de evidenciar que el incremento en la dosis de rejuvenecedor no ha supuesto el beneficio esperado, también contradice con resultados anteriores en el sentido de que las mezclas con aditivo A eran las que mejoraban su rendimiento en mayor proporción a medida que crecía la deformación.

Además, no es posible achacar estos malos resultados, especialmente los de mezcla 1Ar, a una mayor rigidez de las mezclas, lo cual, pone en evidencia que es necesario ahondar en la investigación de este comportamiento. Por ello, para futuras investigaciones se recomienda aislar las distintas variables que puedan estar afectando, hasta conseguir alguna evidencia más clara que pueda justificar estos resultados.



## 4.2. ESTUDIO DE MEZCLAS BITUMINOSAS MODIFICADAS POR VÍA SECA CON POLVO DE NEUMÁTICOS AL FINAL DE SU VIDA ÚTIL (NFU)

En este apartado se muestran los resultados obtenidos durante el estudio de las mezclas bituminosas modificadas con polvo de NFU (Sección 3.2). Siguiendo la metodología descrita, en primer lugar, se muestra la evaluación de la influencia del tiempo de acondicionamiento, mostrando primero el estudio realizado sobre su efecto en la viscosidad del betún, para luego mostrar los resultados obtenidos en los ensayos realizados sobre las mezclas bituminosas. En la segunda parte de esta sección, se muestran los resultados del estudio de evaluación del envejecimiento y posterior reciclabilidad de las mezclas. Concretamente, en esta parte se muestran, por un lado, los resultados obtenidos para los ensayos ejecutados sobre las mezclas bituminosas, y por otro, la evolución de las propiedades del betún en cada una de las fases del estudio.

### 4.2.1. Influencia del tiempo de acondicionamiento en las propiedades del betún

Los resultados obtenidos para las distintas concentraciones de polvo de NFU y los distintos tiempos de acondicionamiento en el ensayo de viscosidad dinámica se muestran en las Figuras 4-34 y 4-35. En estas se ve claramente cómo el polvo de neumático causa una modificación en la viscosidad dinámica del betún. Para ambos tipos de polvo de neumático, la viscosidad del ligante es mayor en todas las situaciones evaluadas que la del betún original. Analizando los resultados del betún original, tras cinco horas en estufa, el efecto del envejecimiento apenas tiene influencia en la viscosidad, y por tanto, las diferencias encontradas pueden atribuirse exclusivamente a la modificación causada por el polvo de neumático.

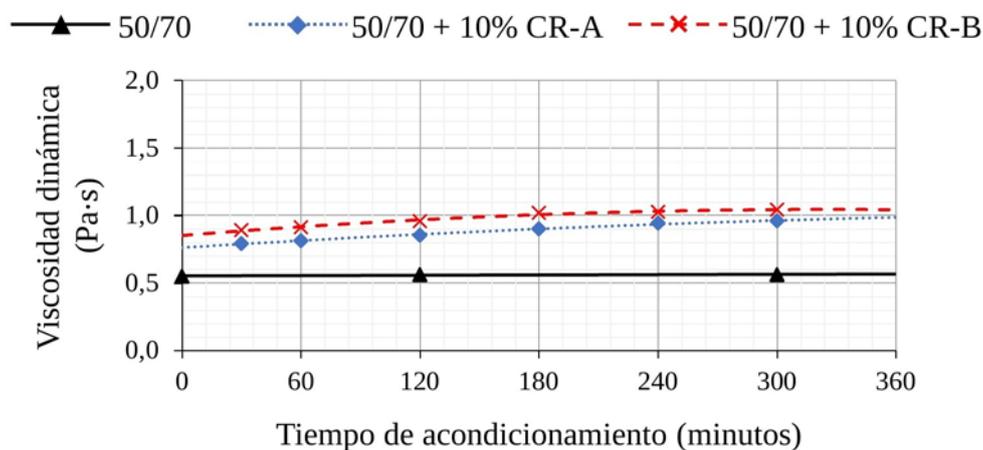


Figura 4-34. Resultados ensayo de viscosidad dinámica. Muestras con 10% de polvo de neumático

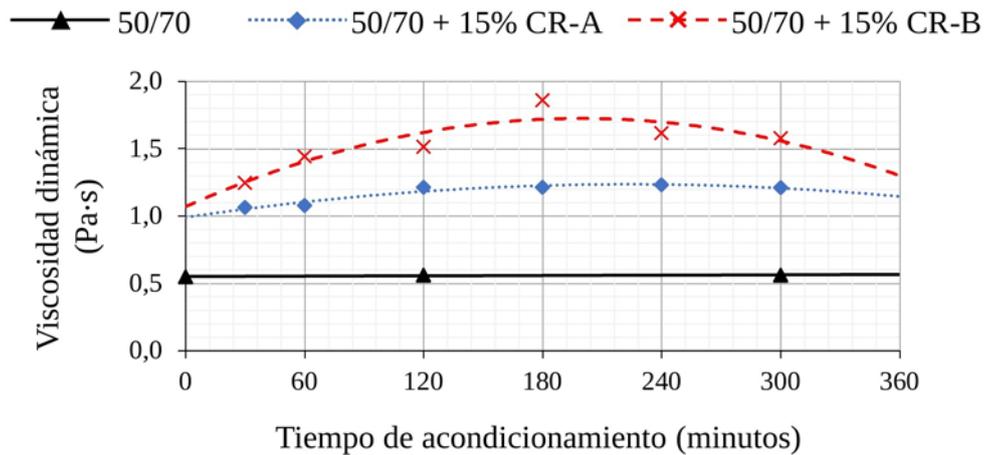


Figura 4-35. Resultados ensayo de viscosidad dinámica. Muestras con 15% de polvo de neumático

De acuerdo con diferentes estudios, la tendencia habitual en este ensayo es incrementar el valor de viscosidad hasta llegar a un máximo, momento en el que esta empieza a disminuir. Esto se achaca principalmente a que a partir de un tiempo determinado tiempo comienza la despolimerización del caucho[145,146]. En este caso, para todas las muestras que incluyen polvo de NFU se aprecia una tendencia que indica que la viscosidad va aumentando a medida que se aumenta el tiempo de acondicionamiento y, especialmente en las muestras con el 15% de polvo de NFU, la viscosidad parece alcanzar un máximo a partir del cual empieza a disminuir. Para analizar de una forma más clara este fenómeno, los resultados han sido ajustados a una curva polinómica de segundo grado, a partir de la cual se ha calculado el valor máximo (Tabla 4-5). Para ello se ha utilizado la siguiente ecuación.

$$\mu = C_1 \times t^2 + C_2 \times t + C_3 \quad (4-1)$$

- $\mu$  Viscosidad dinámica (Pa·s)
- $t$  Tiempo de acondicionamiento (min)
- $C_1, C_2, C_3$  Constantes

Tabla 4-5. Parámetros de ajuste de los resultados de viscosidad dinámica del betún

Muestra	R <sup>2</sup>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	$\mu_{\text{máx}}$	Tiempo ( $\mu_{\text{máx}}$ )
10% CR-B	0,98	-1,82E-06	1,18E-03	0,853	1,05 Pa·s	326 min
10% CR-A	0,99	-8,15E-07	9,17E-04	0,763	1,02 Pa·s	562 min
15% CR-B	0,80	-1,65E-05	6,56E-03	1,071	1,73 Pa·s	199 min
15% CR-A	0,93	-4,89E-06	2,19E-03	0,992	1,24 Pa·s	224 min

En la tabla puede verse cómo ambas muestras con 15% de polvo de neumático alcanzan el valor máximo de densidad en un tiempo inferior al tiempo total de ensayo. La muestra con 15% de CR-B alcanza ese valor máximo en 199 minutos, siendo la muestra que menos tiempo necesita para alcanzarlo. Además, también es la muestra que mayor viscosidad alcanza, incrementando ésta en 0,65 Pa·s hasta alcanzar un valor máximo de 1,73 Pa·s. Por su parte, la muestra con 15% de CR-A requiere de 224 minutos para alcanzar ese máximo, y en este caso la viscosidad se incrementa 0,25 Pa·s hasta llegar a los 1,24 Pa·s.

En cuanto a las muestras con 10% de polvo de neumático, no está tan claro que se alcance un valor máximo de viscosidad, y de hacerlo se alcanzaría fuera del rango de tiempos de ensayo. En cualquier caso, asumiendo que el comportamiento de estas muestras es similar al de las muestras con el 15%, se ha realizado igualmente el ajuste mediante la ecuación polinómica. Haciendo esto se puede ver cómo también en este caso la mezcla con CR-B requiere menos tiempo (326 min) que la mezcla con CR-A (562 min) para alcanzar el valor máximo. Sin embargo, en este caso, el valor máximo alcanzado por ambas es muy parecido, cercano a 1,0 Pa·s.

Este ajuste sirve establecer que la interacción entre betún y polvo de neumático está influenciada tanto por el tipo y el contenido de polvo de neumático, como por el tiempo de acondicionamiento. Los resultados muestran que a 135°C el polvo de tipo CR-B interacciona más rápidamente con el betún utilizado que el polvo de tipo CR-A, siendo la diferencia entre ambos que este último ha sido sometido a un tratamiento específico mediante el uso de polímeros.

Y es precisamente ese tratamiento la variable que en primera instancia parece ser la responsable de estas diferencias. A la vista de los resultados, el hecho de haber sido tratado previamente hace que la interacción entre las partículas de CR-A y el betún no sea tan variable en el tiempo como el caso de las partículas de CR-B. Por otra parte, estos resultados también podrían achacarse a que las partículas de tipo CR-B poseen mayor superficie específica que las partículas de tipo CR-A, y por tanto, mayor capacidad de interactuar con el betún, en consonancia con lo expuesto por Dantas Neto *et al.* (2006) y Loderer *et al.* (2018) en sus publicaciones [144,145].

Sin embargo, la existencia de diferencias en la superficie específica suelen ser más obvias cuando el polvo de neumático ha sido producido por diferentes técnicas. En este caso, en que ambos han sido producidos mediante molido a temperatura ambiente, no se aprecian diferencias significativas ni en forma ni en textura, como ya se comentó en la [Sección 3.2.1](#). Por ello, en este caso, la influencia que pueda tener el tratamiento aplicado a las partículas de CR-A en su interacción con el betún se posiciona como la principal razón que justifica estos resultados.

Por otra parte, no sorprende que la cantidad de polvo utilizada influya en la viscosidad. Mayor cantidad de polvo de neumático, y por tanto, una mayor superficie de contacto con el betún se traduce en una interacción más rápida y con mayor influencia en la viscosidad. Este mismo comportamiento también ha sido reportado por Lo Presti y Airey (2013) en un estudio donde los autores evalúan la influencia del contenido de polvo de neumático en las propiedades del betún, concluyendo que existe una influencia directa entre la cantidad utilizada y los cambios en las características del betún. En dicho estudio, los autores concluyen que una dosis del 15% parece ser el mínimo a partir del cual se obtienen cambios significativos en el comportamiento del betún, conclusión que se muestra perfectamente compatible con lo mostrado en este estudio [146].

Por último, es necesario resaltar que, pese a que las concentraciones y los tiempos de contacto entre betún y polvo de neumático son iguales, el procedimiento de preparación de estas muestras difiere del procedimiento de preparación de la mezcla. Es por tanto necesario dejar claro que este estudio se trata de un estudio tentativo de lo que puede ocurrir en las mezclas modificadas por vía seca, donde también se espera que los resultados manifiesten una mayor interacción con las partículas de tipo CR-B.

#### **4.2.2. Análisis de la influencia del tiempo de acondicionamiento en el comportamiento mecánico de la mezcla**

En este apartado se muestran los resultados obtenidos para el contenido de huecos, el ensayo Marshall y el ensayo de sensibilidad al agua obtenidos para cada una de las muestras y para cada uno de los tiempos de acondicionamiento aplicados (ver Sección 3.2.7). Recordar brevemente que en este estudio se ha evaluado la influencia que tiene el tiempo de acondicionamiento (60, 90 y 120 minutos) sobre las propiedades de dos mezclas modificadas con dos tipos distintos polvo de neumático por vía seca, ambas utilizando un betún 50/70 convencional, comparando los resultados con los obtenidos en una mezcla de referencia fabricada con un betún modificado con polímeros convencional de tipo PmB 45/80-65.

##### *4.2.2.1 Contenido de huecos*

Con las dosificaciones descritas en la Sección 3.2.5 y siguiendo la metodología expuesta en la Sección 3.2.7, para cada una de las mezclas desarrolladas se han obtenido las propiedades volumétricas que se muestran en la Figura 4-36. En esta figura se puede ver cómo todas las mezclas alcanzan un valor de huecos adecuado para el tipo de mezcla, de acuerdo con los requerimientos suizos (entre 10 y 14%).

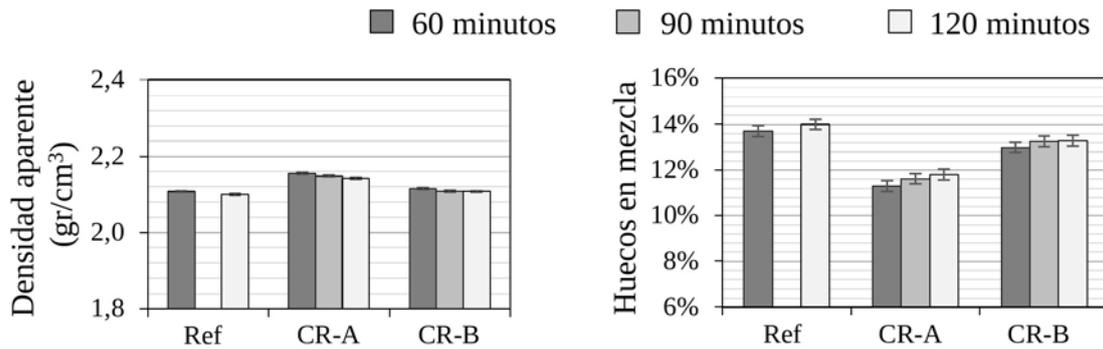


Figura 4-36. Propiedades volumétricas de las mezclas bituminosas modificadas con polvo de NFU

Comparando con la mezcla de referencia, ambas mezclas experimentales muestran un menor contenido de huecos. En principio, al incorporarse por vía seca, la presencia de las partículas de caucho ocupando los huecos parece ser la razón que justifica este hecho, ya que, como se dijo anteriormente, la granulometría de estas mezclas no ha sido ajustada para contemplar la presencia de estas partículas ni su hinchamiento al interactuar con el betún.

Se observa también en esta figura que existen diferencias en el contenido de huecos dependiendo del tipo de polvo de NFU utilizado. Independientemente del tiempo de acondicionamiento utilizado, la mezcla con CR-B tienen más huecos que la mezcla con CR-A, siendo el tipo de polvo la única diferencia entre ambas. De acuerdo con los resultados del ensayo de viscosidad, estas diferencias podrían atribuirse principalmente a la mayor viscosidad alcanzada por el betún en la mezcla con CR-B. Otros motivos también podrían ser las posibles diferencias en la granulometría del polvo de NFU o la diferencia en el contenido efectivo de betún a causa de una mayor absorción de este por parte de las partículas de tipo CR-B.

#### 4.2.2.2. Ensayo Marshall

Los resultados del ensayo Marshall se muestran en la Figura 4-37, donde puede verse cómo el tiempo de acondicionamiento tiene una influencia significativa en estos resultados, encontrando diferencias apreciables en función del tipo de polvo de NFU utilizado.

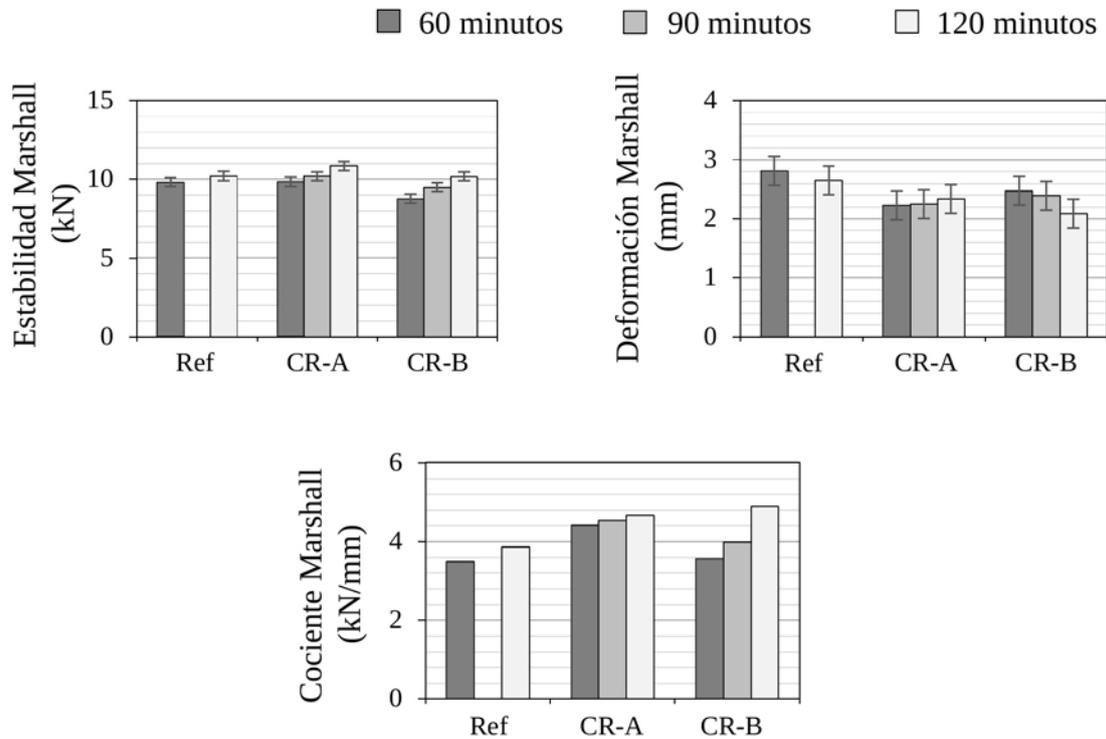


Figura 4-37. Resultados del ensayo Marshall

Estos resultados muestran en la mezcla de referencia un comportamiento normal, aumentando la estabilidad cuando se incrementa el tiempo que permanece en estufa a la vez que se reduce la deformación, denotando por tanto una mayor rigidez, como así queda plasmado en el valor del cociente Marshall.

Por su parte, la mezcla modificada con CR-A presenta tras 60 minutos de acondicionamiento un valor de estabilidad muy similar al de la mezcla de referencia en esas mismas condiciones. Por su parte, esta mezcla es más rígida al ser la deformación alcanzada por esta mezcla inferior a la alcanzada por la mezcla de referencia.

Pero lo realmente destacable en el comportamiento está en la evolución de estos valores con el aumento del tiempo de acondicionamiento. Esta mezcla mantiene prácticamente constantes los valores de estabilidad y deformación, manteniendo por tanto un valor de cociente Marshall igualmente constante.

Estos resultados muestran estar muy de acuerdo con los resultados obtenidos en el ensayo de viscosidad ejecutado sobre el betún, donde también se ponía de manifiesto que el tiempo de acondicionamiento apenas tenía influencia en la viscosidad del betún. En este caso, este ensayo refleja que el tiempo de acondicionamiento tampoco tiene una gran influencia en los valores de estabilidad y deformación Marshall de la mezcla.

Sin embargo, el tiempo de acondicionamiento sí muestra ser una variable importante en los resultados de este ensayo para la mezcla modificada con CR-B. En este caso, a medida que incrementa el tiempo de digestión, la estabilidad, que presenta un valor inferior al de la mezcla con CR-A para 60 minutos, se va incrementando notablemente hasta alcanzar un valor muy cercano al de dicha mezcla para 120 minutos.

Esta influencia del tiempo de acondicionamiento también se manifiesta en los valores de deformación, la cual se va reduciendo a medida que se incrementa el tiempo, denotando junto con el incremento de la estabilidad que la mezcla cada vez es más rígida. Trasladados estos resultados al valor del cociente Marshall también se puede ver claramente cómo el tiempo de acondicionamiento hace que este valor aumente significativamente.

Estos resultados, al igual que ocurría con la mezcla modificada con CR-A, también se muestran de acuerdo con el análisis realizado para el ensayo de viscosidad. En este caso, el comportamiento de las mezclas si muestra estar influenciado por el tiempo de acondicionamiento, del mismo modo que ocurría con los resultados de viscosidad.

Por último, merece ser destacado el hecho de que las mezclas modificadas con polvo de neumático muestren unos resultados que son muy comparables con el resultado de la mezcla de referencia, insistiendo en que esta última utiliza un betún modificado con polímeros (requisito normativo). De esta forma, utilizar un betún convencional en una mezcla modificada por vía seca con polvo de neumático se postula, de momento, como una buena alternativa para este tipo de mezclas.

#### 4.2.2.3. Sensibilidad al agua

En la Figura 4-38 se recogen los resultados del ensayo de sensibilidad al agua. Recordar que en este caso se ensayaron probetas fabricadas con 60 y 120 minutos de tiempo de acondicionamiento.

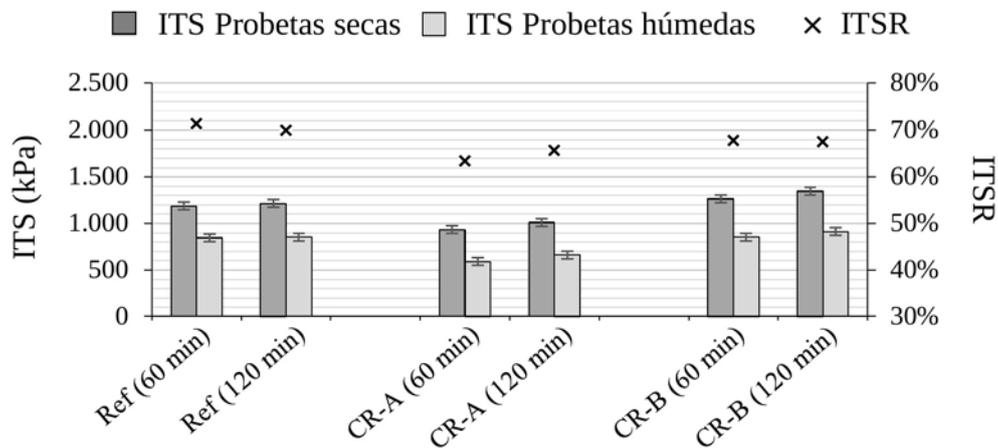


Figura 4-38. Resultados del ensayo de sensibilidad al agua

Analizando los resultados se aprecia cómo los valores de ITS parecen aumentar ligeramente con el tiempo de acondicionamiento, tanto para las probetas húmedas como para las secas, sin que estos cambios lleguen a ser significativos y sin provocar ninguna variación notable en el valor de resistencia conservada (ITSR).

Hay que destacar por dos motivos la mezcla modificada con CR-B. En primer lugar es llamativo que no varíe apenas el resultado en función el tiempo de acondicionamiento, cuando en otros ensayos esta mezcla sí que ha manifestado cambios. Por otro lado, es destacable el hecho de que las mezclas con CR-B presenten valores más altos de resistencia a tracción indirecta que las mezclas con CR-A y similares, e incluso superiores en algunos casos, a los de la mezcla de referencia.

Por último, en lo relativo al valor de ITSR, las mezclas experimentales se quedan ligeramente por debajo del valor requerido por la legislación suiza para este tipo de mezclas (> 70%). Sin embargo, la mezcla de referencia tampoco muestra un valor extraordinariamente alto, cumpliendo estrictamente con el requisito normativo. Dicho esto, mejorar el resultado de las mezclas experimentales para salvar las pequeñas diferencias mostradas respecto de la mezcla de referencia podría pasar por una optimización de la fórmula de trabajo o por la utilización de algún aditivo que mejore la adhesividad entre áridos y betún.

### **4.2.3. Análisis de la integración de las partículas de polvo de NFU en la mezcla bituminosa utilizando microscopia electrónica de barrido ambiental (ESEM)**

En este apartado se muestran algunas imágenes tomadas con el microscopio electrónico de barrido ambiental (ESEM) de las mezclas modificadas con CR-B para 60 y 120 minutos de tiempo de acondicionamiento. Como se puede ver, mientras que tras 60 minutos aún pueden distinguirse las partículas de caucho con relativa claridad (Figuras 4-39 y 4-10), tras 120 minutos estas apenas pueden ser distinguidas dentro del mástico, indicando por tanto una mayor interacción (Figuras 4-41 y 4-42). Las fibras contenidas en el polvo de neumático (ver Figura 3-19) aún siguen presentes en la mezcla tras 120 minutos, dando a entender que se trata de algún componente que no interacciona con el betún.

Estas imágenes, por tanto, ponen de manifiesto lo que ya se había comentado en las secciones anteriores, donde tanto el betún como las mezclas que incorporan el polvo de NFU de tipo CR-B habían mostrado que existe una influencia del tiempo de acondicionamiento en los resultados obtenidos. Estas imágenes también muestran que, manteniendo la mezcla a una temperatura alta durante el tiempo pertinente, es posible conseguir una buena interacción entre las partículas de caucho y el betún, consiguiendo que se modifiquen las propiedades de este último.

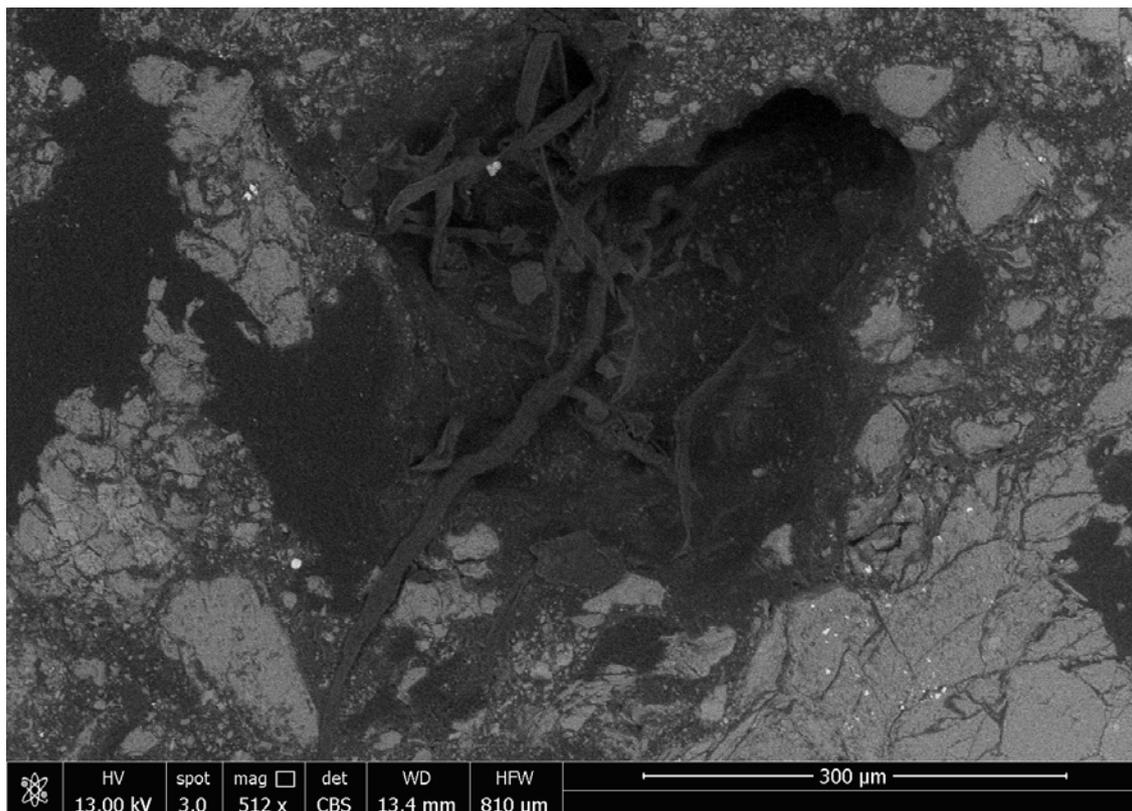


Figura 4-39. Imagen del estado de digestión de las partículas de caucho en la mezcla bituminosa (ESEM). 60 minutos de tiempo de acondicionamiento. Imagen 1

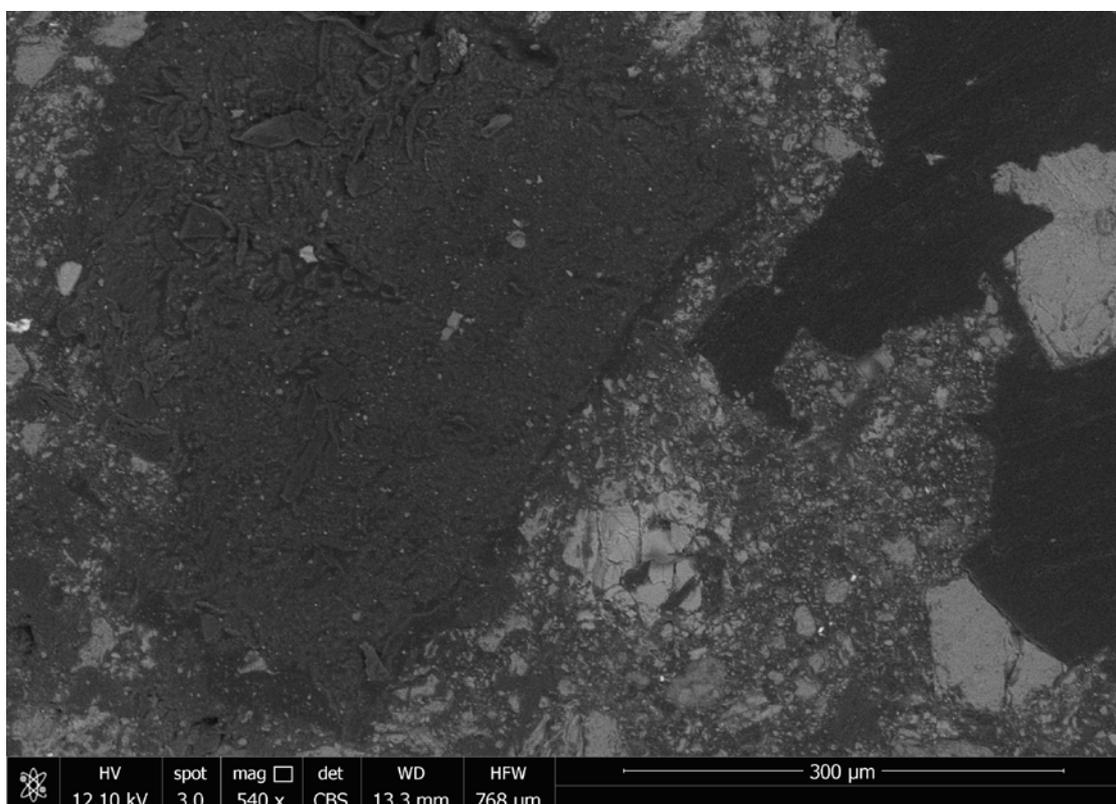


Figura 4-40. Imagen del estado de digestión de las partículas de caucho en la mezcla bituminosa (ESEM). 60 minutos de tiempo de acondicionamiento. Imagen 2

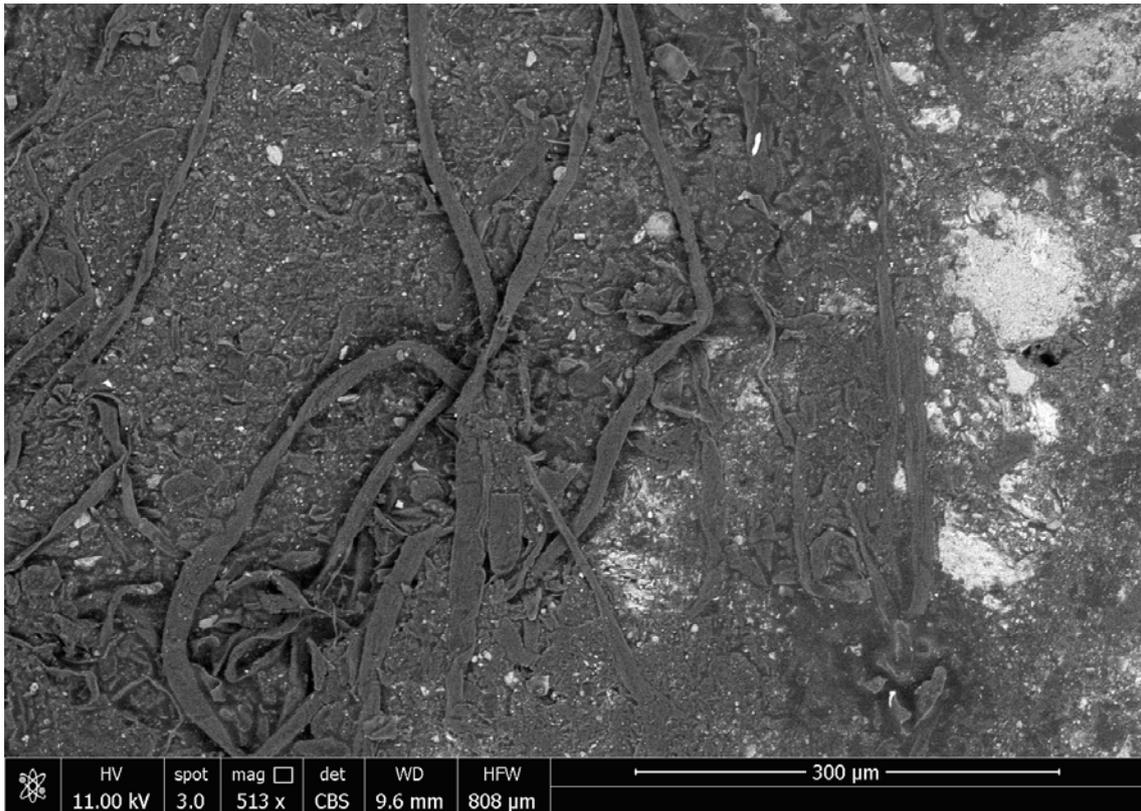


Figura 4-41. Imagen del estado de digestión de las partículas de caucho en la mezcla bituminosa (ESEM). 120 minutos de tiempo de acondicionamiento. Imagen 1

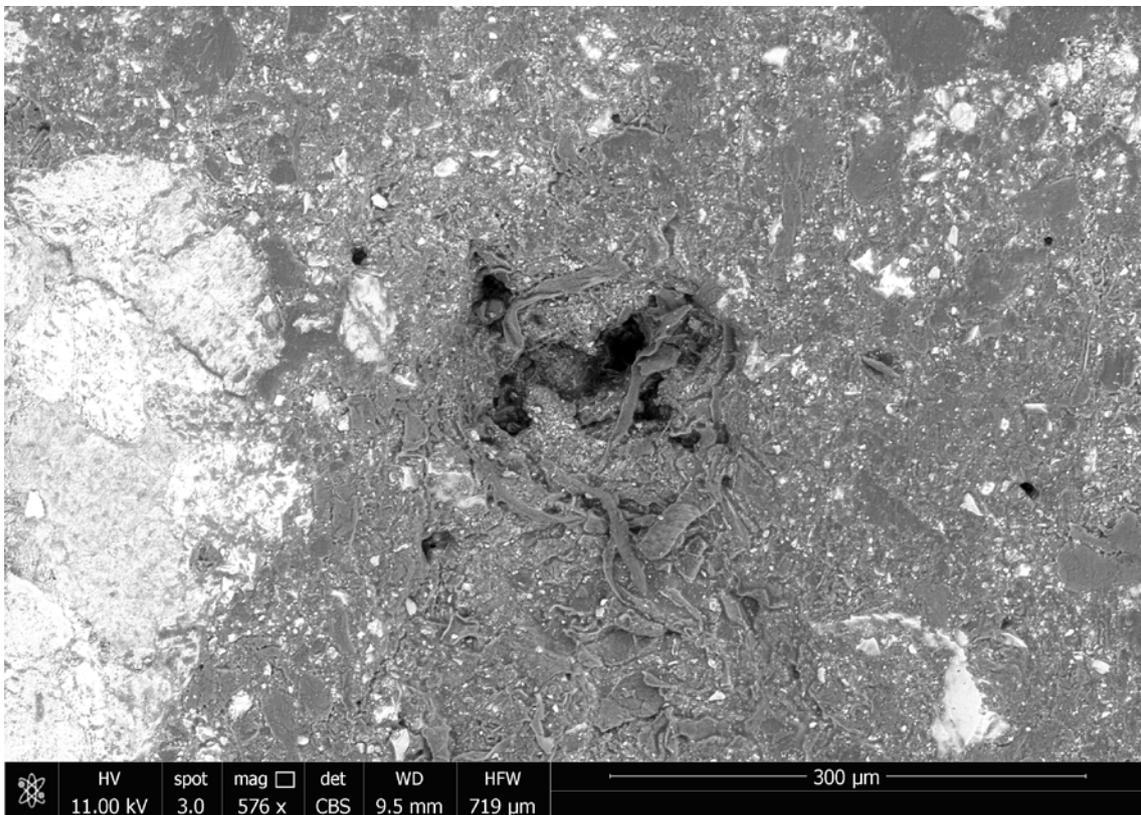


Figura 4-42. Imagen del estado de digestión de las partículas de caucho en la mezcla bituminosa (ESEM). 120 minutos de tiempo de acondicionamiento. Imagen 2

#### 4.2.4. Estudio del envejecimiento y de la reciclabilidad de las mezclas desarrolladas

De acuerdo con la metodología propuesta para este estudio, en primer lugar se muestran, para cada una de las fases en que se divide este estudio, el resultado obtenido para cada uno de los ensayos ejecutados sobre las mezclas bituminosas: contenido de huecos, ensayo Marshall y ensayo de sensibilidad al agua. Para una interpretación más clara de los resultados, se hace referencia como “mezcla original” a la mezcla tras los 120 minutos de tiempo de acondicionamiento, cómo “mezcla envejecida” a la mezcla tras el periodo de envejecimiento a largo plazo, y como “mezcla reciclada” a la mezcla re-amasada junto con el rejuvenecedor. Finalmente, se cierra este apartado mostrando los resultados de módulo complejo y ángulo de fase determinados para cada betún en cada una de las fases.

##### 4.2.4.1 Contenido de huecos

En la Figura 4-43 se muestran nuevamente las propiedades volumétricas de las mezclas preparadas con 120 minutos de tiempo de acondicionamiento, y junto a ellas, las propiedades volumétricas de las mezclas recicladas. La densidad de las mezclas compactadas tras la incorporación del rejuvenecedor y el posterior amasado es ligeramente superior en comparación con la mezcla original, con la consiguiente reducción en el volumen de huecos, indicando, por tanto, que la incorporación del aditivo ejerce una influencia en la trabajabilidad de la mezcla. En este sentido, no es posible destacar ninguna diferencia significativa entre la mezcla de referencia y las mezclas modificadas, mostrando todas ellas una tendencia a reducir el contenido de huecos en una proporción similar.

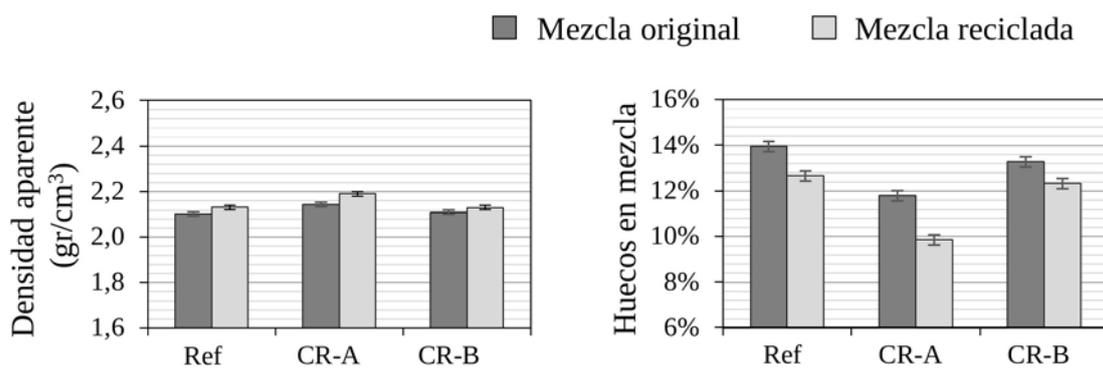


Figura 4-43. Propiedades volumétricas de las mezclas bituminosas modificadas con polvo de NFU (estudio de reciclabilidad)

#### 4.2.4.2. Ensayo Marshall

En la Figura 4-44 se recogen los valores de estabilidad, deformación y cociente Marshall para cada una de las fases del estudio.

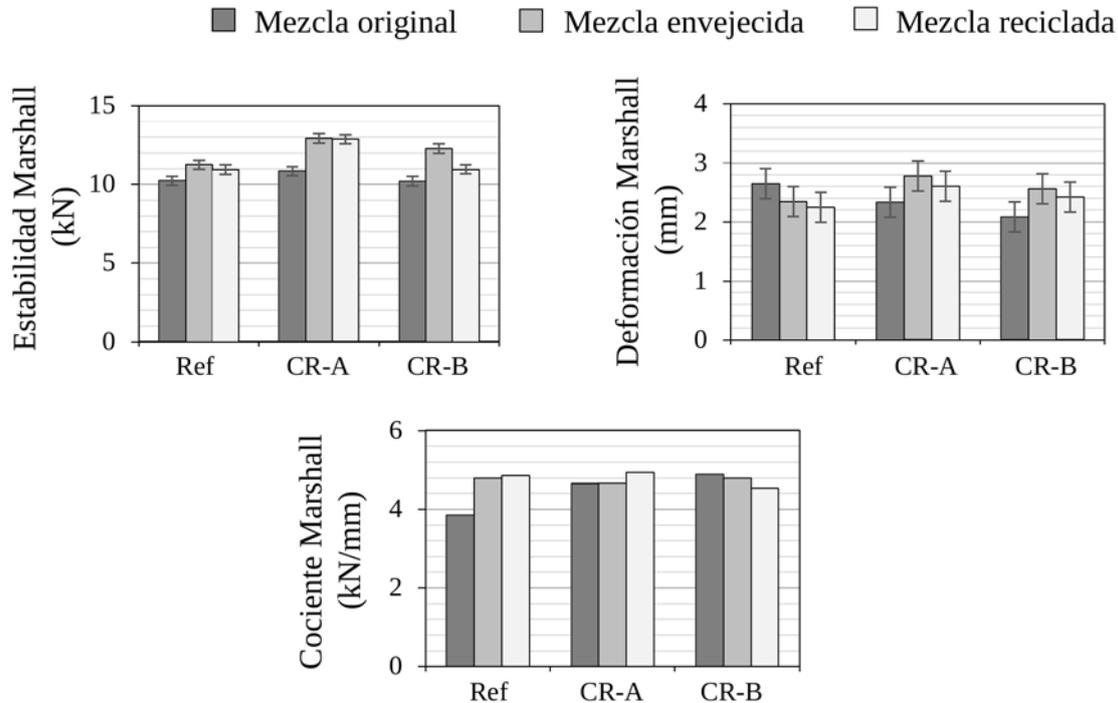


Figura 4-44. Resultados del ensayo Marshall (estudio de reciclabilidad)

En primer lugar, comparando entre los resultados antes y después del envejecimiento a largo plazo, las mezclas modificadas con polvo de NFU muestran un comportamiento distinto al mostrado por la mezcla de referencia. Tras el envejecimiento, la mezcla de referencia incrementa su valor de estabilidad a la vez que reduce su valor de deformación, resultado por tanto en un MQ mayor, indicativo de una mayor rigidez de la mezcla.

Sin embargo, las dos mezclas modificadas incrementan tanto la estabilidad como la deformación en una proporción más o menos similar, manteniendo un valor de MQ muy similar tras el envejecimiento a largo plazo, e incluso reduciéndolo ligeramente en el caso de la mezcla modificada con CR-B. Este hecho manifiesta, por tanto, que la modificación con polvo de neumático por vía seca provoca que la mezcla sea capaz de resistir cargas mayores pero que a su vez mantenga una capacidad de deformación tal que hace que la rigidez se mantenga constante a medida que se envejece.

Estos resultados, si bien es recomendable validarlos mediante ensayos específicos de rigidez, apuntan a que las mezclas modificadas con polvo de neumático presentan una menor susceptibilidad al envejecimiento que una mezcla convencional fabricada con betún modificado con polímeros.

Por otra parte, analizando las mezclas recicladas, también existen ciertas diferencias en el comportamiento. En primer lugar, la mezcla de referencia apenas varía sus resultados con respecto de la mezcla envejecida a largo plazo, lo que hace pensar en que la incorporación del aditivo apenas tiene efecto sobre la rigidez de la mezcla. Sin embargo, las diferencias en el contenido de huecos entre la mezcla reciclada (con menos huecos) y la mezcla original parecen ser la principal razón que justifica estos resultados (a menor contenido de huecos se le asocia mayor rigidez de la mezcla [147]), justificando esa mayor rigidez que parece indicar el valor de MQ en el menor contenido de huecos de la mezcla reciclada.

En cambio, el comportamiento de las mezclas modificadas es diferente. En el caso de la mezcla modificada con CR-B, la mezcla reciclada toma valores tanto de estabilidad como de deformación inferiores, acercándose de nuevo a los valores de la mezcla original pero sin llegar a alcanzarlos. El cociente Marshall en esta mezcla se mantiene en un nivel muy próximo al mostrado en todas las fases del estudio, reduciéndose ligeramente, sin manifestar en ningún momento un aumento en la rigidez producto del menor contenido de huecos de esta mezcla.

En la mezcla modificada con CR-A, por su parte, también se reduce la deformación ligeramente pero, en este caso, apenas varía el valor de estabilidad, lo que hace que se incremente ligeramente el valor de MQ, pero sin que este incremento sea destacable con respecto al valor mostrado en el resto de fases. A la vista de estos resultados, extraer alguna conclusión sobre la influencia que el aditivo ejerce sobre las distintas mezclas se hace demasiado difícil, siendo imposible aislar este efecto del efecto causado por las diferencias en el contenido de huecos.

#### 4.2.4.3. Sensibilidad al agua

Los resultados obtenidos en este ensayo se muestran en la siguiente figura.

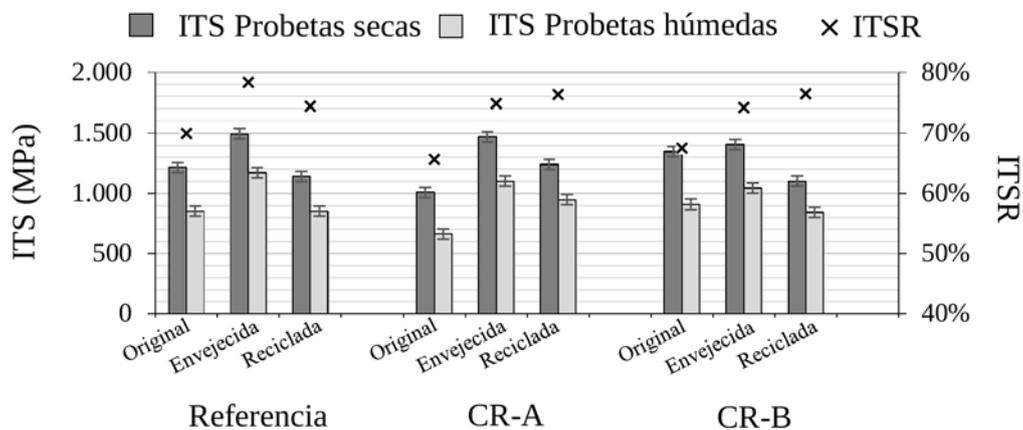


Figura 4-45. Resultados del ensayo de sensibilidad al agua (estudio de reciclabilidad)

Este ensayo, aparte de ser un buen indicador de la adhesividad entre áridos y ligante, permite analizar el efecto del envejecimiento a través de la evolución de los valores de resistencia a tracción indirecta. Mirando estos valores, tras el envejecimiento a largo plazo, la tendencia para todas las mezclas es a que estos aumenten, lo cual entraría dentro de la lógica.

Sin embargo, lo interesante se muestra en la magnitud de ese cambio. En particular, la mezcla de referencia y la mezcla modificada con CR-A muestran un incremento significativo en el valor de ITS, mayor en esta última, mientras que la mezcla con CR-B varía ligeramente este valor, sin que ese cambio sea estadísticamente significativo.

Estos resultados se muestran de acuerdo con los resultados del ensayo Marshall en tanto que la mezcla modificada con CR-B presenta, en comparación con la mezcla de referencia, una menor susceptibilidad al envejecimiento. Sin embargo, los resultados mostrados por la mezcla modificada con CR-A sorprenden en la medida que indican una mayor susceptibilidad al envejecimiento que la mezcla de referencia, lo cual contradice a los resultados del ensayo Marshall.

Analizando los valores de resistencia conservada, se puede ver cómo el efecto del envejecimiento se traduce en una mejoría del comportamiento de la mezcla, incrementando este valor significativamente con respecto de las mezclas originales. Destacar que en este caso no existen diferencias entre mezclas, encontrando para todas ellas un incremento de aproximadamente 7 puntos con respecto del valor de la mezcla original.

En cuanto a la mezcla reciclada, para todas los tipos que los valores de ITS disminuyen con respecto de la mezcla envejecida a largo plazo, habiendo, eso sí, diferencias en la magnitud de esa reducción. Mientras que la mezcla de referencia recupera valores de ITS muy similares a los de la mezcla original, la mezcla modificada con CR-A mantiene valores más altos y la mezcla modificada con CR-B toma valores inferiores a los mostrados originalmente por estas mezclas.

Estos resultados obtenidos para las mezclas experimentales se muestran muy de acuerdo con los resultados de MQ obtenidos en el ensayo Marshall. En ese caso, la incorporación del rejuvenecedor también provocaba un mayor efecto sobre la mezcla modificada con CR-B, denotando una menor rigidez de esta mezcla, mientras que para la mezcla modificada con CR-A este efecto no era tan acusado, manteniendo esta un valor de MQ más alto que el de la mezcla original.

#### 4.2.4.4. Determinación del módulo complejo y el ángulo de fase

En primer lugar, en la Figura 4-46 se muestran los valores de módulo complejo, representados a través de las curvas maestras, para cada una de las muestras de betún extraído las mezclas justo después del proceso de acondicionamiento de 120 minutos (sustitutivo en este caso del proceso de envejecimiento a corto plazo) y antes de someter a estas al envejecimiento a largo plazo (LTOA). En esta figura se puede ver cómo el betún de todas las mezclas presenta una rigidez parecida a frecuencias reducidas altas. Sin embargo, a medida que se reduce la frecuencia se van manifestando diferencias, presentando menor rigidez las mezclas modificadas, especialmente la mezcla modificada con CR-A.

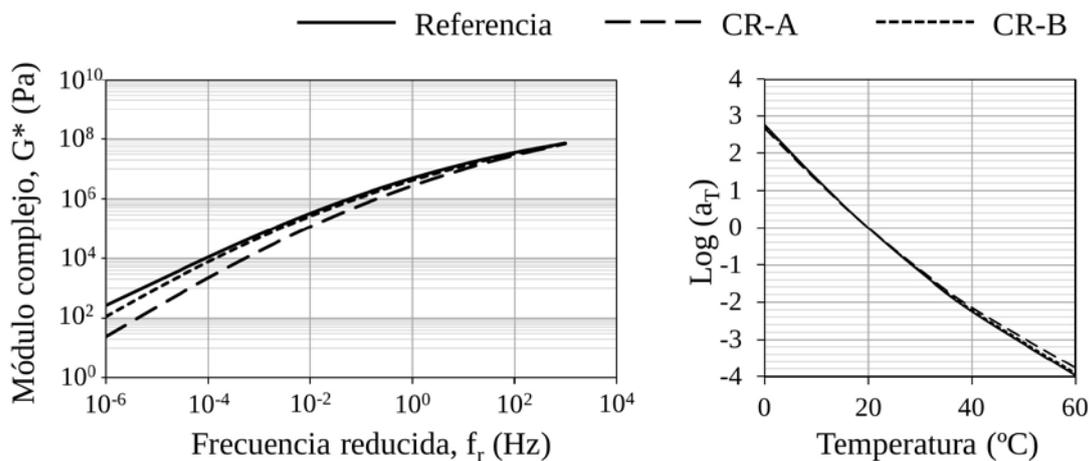


Figura 4-46. Curvas maestras de módulo complejo ( $G^*$ ) (estudio de reciclabilidad)

Estos resultados contradicen en cierta medida a los resultados del ensayo Marshall, los cuales indicaban una mayor rigidez en las mezclas experimentales. Sin embargo, al tratarse de una modificación por vía seca, la influencia que el polvo de neumático pueda ejercer sobre la rigidez de la mezcla va más allá de la modificación de las propiedades del betún, debiendo considerarse también la influencia que pueda tener sobre la rigidez de la mezcla la posible presencia de partículas elásticas dentro de la mezcla. Comparando entre ambas mezclas experimentales, la modificación con partículas de tipo CR-A provoca que la rigidez del betún resultante sea menor a las del betún modificado con partículas de tipo CR-B.

Comparando con estos resultados obtenidos en el betún de las mezclas originales, en las siguientes figuras se muestran los valores de módulo complejo obtenidos para cada muestra en las posteriores fases del estudio.

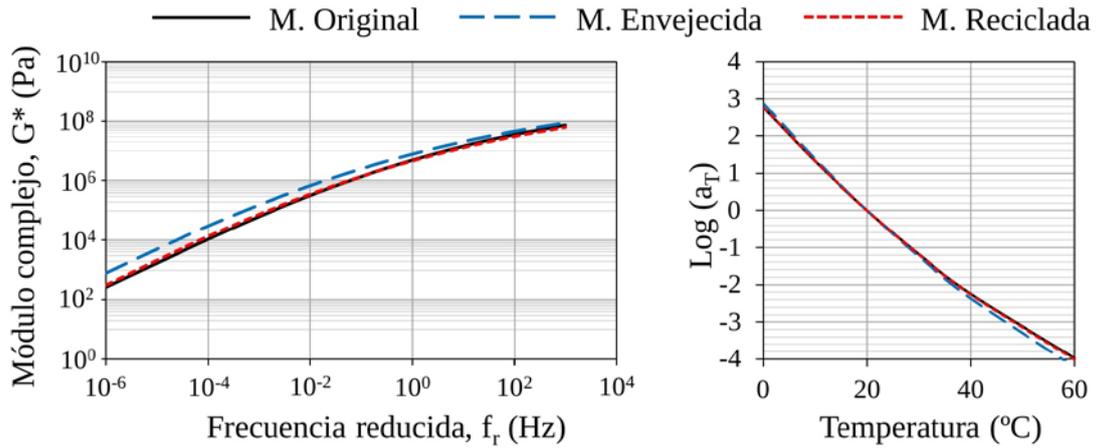


Figura 4-47. Curvas maestras de módulo complejo ( $G^*$ ) (estudio de reciclabilidad).  
Mezcla de referencia

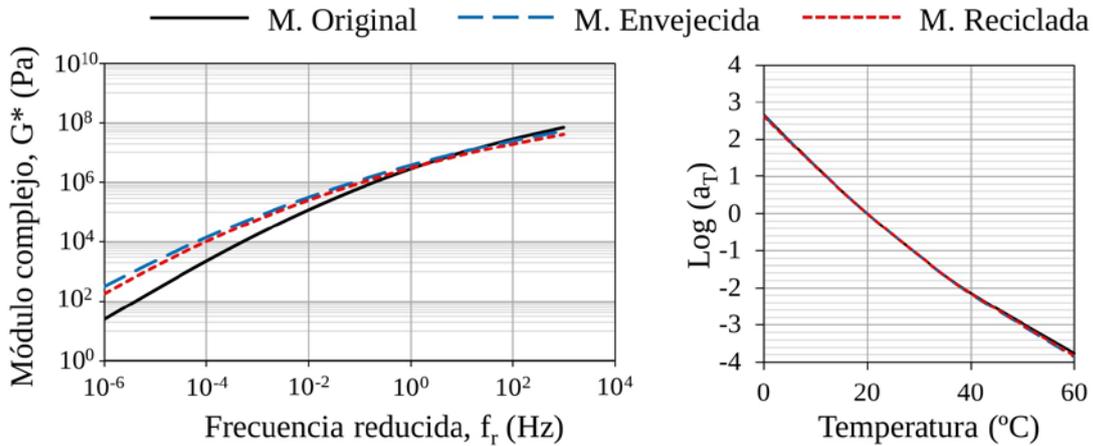


Figura 4-48. Curvas maestras de módulo complejo ( $G^*$ ) (estudio de reciclabilidad).  
Mezcla modificada con CR-A

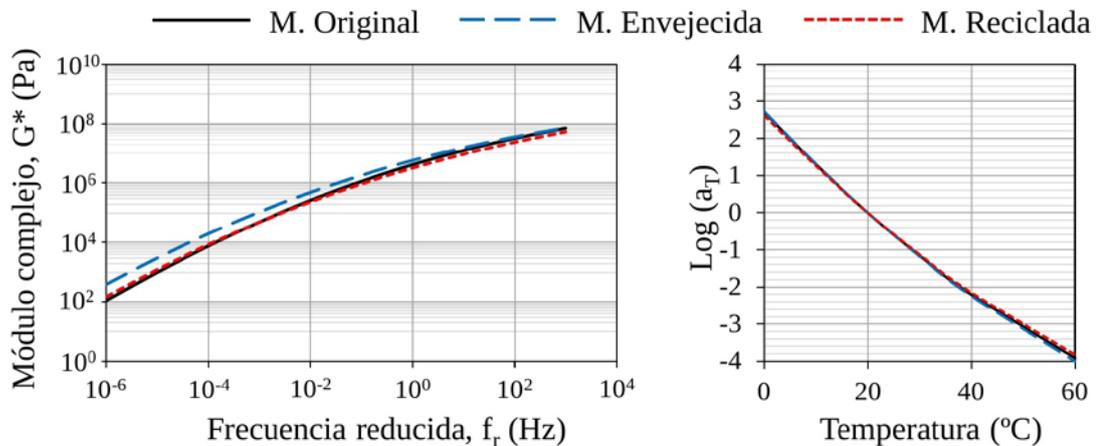


Figura 4-49. Curvas maestras de módulo complejo ( $G^*$ ) (estudio de reciclabilidad).  
Mezcla modificada con CR-B

Los resultados muestran que todas las muestras incrementan el valor de módulo complejo tras el proceso de envejecimiento a largo plazo. Destacar únicamente los resultados del betún de la muestra con CR-A ya que ese incremento no es tan regular como en el resto de muestras, mostrando un incremento muy grande a frecuencias reducidas bajas, mientras que a frecuencias reducidas altas apenas hay variación.

En cualquier caso, estos resultados ponen de manifiesto que el envejecimiento sí tiene influencia sobre las propiedades del betún, provocando un incremento en el valor de módulo complejo de similar magnitud al mostrado por el betún modificado de la mezcla de referencia.

Estos resultados contradicen en cierta medida a los resultados del ensayo Marshall, los cuales indicaban que las mezclas experimentales apenas varían su rigidez tras el envejecimiento a largo plazo. Sin embargo, el comportamiento mostrado en el ensayo de sensibilidad al agua sí que muestra una tendencia similar a la mostrada por estos resultados, denotando que el envejecimiento sí ejerce cierta influencia en los resultados.

Por último, mirando los resultados del betún obtenido en la última fase, tras la incorporación de aditivo, en la mezcla de referencia y en la mezcla modificada con CR-B se recuperan los valores de módulo complejo a niveles similares a los del betún de la mezcla original. Sin embargo, esta reducción apenas se produce en el betún de la mezcla modificada con CR-A, manteniendo los valores de módulo complejo muy cercanos a los obtenidos en el betún de la muestra tras el envejecimiento.

## **CAPÍTULO V - CONCLUSIONES**



## 5.1. CONCLUSIONES

A lo largo de esta investigación ha quedado demostrada la viabilidad técnica de mezclas bituminosas compuestas por tasas muy elevadas de materiales alternativos.

En este sentido, a partir de la incorporación de un porcentaje de fresado de hasta un 40% del volumen de la mezcla, se consigue tanto una aportación de áridos a la mezcla como una importante reducción del betún utilizado, esta última potenciada por el uso de aditivos específicos.

Además, con la incorporación de subproductos industriales completando la fracción del árido, es posible conseguir mezclas bituminosas que, por un lado, cumplen en laboratorio con los requisitos técnicos marcados por la normativa vigente, y por otro, reducen significativamente la cantidad de recursos naturales utilizados en la fabricación de la mezcla.

En lo que respecta al uso de polvo de neumáticos usados en la fabricación de mezclas bituminosas, en esta tesis ha quedado demostrado que mediante la incorporación por vía seca de este material en mezclas fabricadas con betún convencional, es posible alcanzar un comportamiento mecánico similar al de una mezcla de referencia fabricada con betún convencional modificado con polímeros.

### 5.1.1. Conclusiones particulares del estudio de la utilización de residuos industriales y fresado en mezclas bituminosas

- Mezclas diseñadas con un reemplazo de los áridos entre el 80 y el 98% han mostrado un comportamiento en laboratorio adecuado que garantiza el cumplimiento de las prescripciones marcadas por el PG-3. Estas mezclas cumplen, para las condiciones más restrictivas de clima y tráfico, con los requisitos relativos a contenido de huecos, ensayo de sensibilidad al agua y ensayo de rodadura.
- El uso combinado de fresado y aditivos permite reducir significativamente la cantidad de betún aportado a la mezcla, superando las exigencias normativas más restrictivas para el tipo de mezcla evaluado. Con porcentajes de fresado entre el 20 y el 40% del volumen de la mezcla, bajo determinadas condiciones, es posible alcanzar reducciones del 30-40% del betún de aportación utilizado.

- La escoria negra utilizada en esta investigación parece ser una excelente alternativa para ocupar la fracción gruesa del árido en cualquiera de las mezclas bituminosas recogidas en artículo 542 del PG-3 en cualquier condición de clima y tráfico. Avalada por sus buenas características tanto de forma como de resistencia al desgaste (LA=18), dentro de la mezcla, esta escoria constituye un esqueleto mineral con una gran capacidad resistente, dotando a la mezcla un buen comportamiento especialmente en términos de fallo por deformación permanente.
- La escoria LD utilizada ve limitado su uso por el resultado del coeficiente de pulimento acelerado (PSV=52), de forma que, solo sería posible su empleo en mezclas para capa de rodadura cuando el tráfico no supere la categoría T1. Por lo demás, gracias tanto a su forma como a la adecuada resistencia al desgaste (LA=20), este material sería apto para ser utilizado en la fracción gruesa del árido, dotando también a la mezcla de un esqueleto mineral resistente a las deformaciones permanentes.
- El mayor peso específico de las escorias en comparación con el resto de áridos utilizados hace que, durante la fase de diseño, el ajuste granulométrico deba realizarse utilizando porcentajes en volumen. Esta característica de las escorias también hace que la mezcla resultante sea más pesada por unidad de volumen que una mezcla convencional, influyendo directamente sobre las operaciones de fabricación, transporte y puesta en obra. De hecho, el impacto generado sobre el transporte puede suponer que el uso de escorias no fuese rentable ni económicamente ni en términos de contaminación.
- Las mezclas que incorporan arena de moldeo en la fracción fina del árido necesitan más ligante que las mezclas análogas donde dicha arena se sustituye por árido calizo convencional. Este resultado se asocia principalmente a la mayor absorción que presenta la arena de moldeo utilizada en comparación con la arena caliza. Por lo demás, el uso de este material no supone ningún inconveniente en términos de comportamiento mecánico de las mezclas.
- El principal inconveniente del fresado para poder ser utilizado capa de rodadura son las características de su árido grueso. Con un coeficiente de Los Ángeles de 23 y un coeficiente de pulimento acelerado de 46, la normativa española solamente permite su uso en esta capa cuando el tráfico no supere la categoría T32. Para capas inferiores, en lo que a características del árido se refiere, este fresado podría utilizarse sin ninguna restricción.

- La incorporación del aditivo rejuvenecedor (aditivo A) sobre muestras de betún envejecido en una dosis del 2,5% del peso de este, permite reducir considerablemente la rigidez de dicho betún, a la vez que se reduce su capacidad de recuperación elástica y se mejora su comportamiento ante esfuerzos de fatiga.

Por su parte, con la incorporación del aditivo fluidificante (aditivo B) también se consigue un efecto similar al producido por el aditivo rejuvenecedor. Sin embargo, la mejora conseguida a fatiga no es tan significativa cuando se usa este aditivo.

- Entre los dos aditivos utilizados, el considerado como rejuvenecedor (aditivo A) ha mostrado un mejor rendimiento en ciertos aspectos que lo posicionan como mejor alternativa frente al aditivo fluidificante (aditivo B). La principal diferencia entre utilizar uno u otro se encuentra en el comportamiento a fatiga tanto de las muestras de betún como de las mezclas bituminosas, donde el uso del aditivo A permite obtener mejores resultados. Para el resto de ensayos ejecutados, utilizar un aditivo u otro no supone que existan diferencias significativas en el comportamiento de las mezclas.
- Las mezclas bituminosas experimentales (mezclas 1A, 1B, 5A y 5B) han mostrado una rigidez superior a la de la mezcla convencional de referencia, resultando por tanto en unas mezclas menos deformables al paso del tráfico. El comportamiento a fatiga de estas mezclas, pese a que existe cierta variabilidad en los resultados, es adecuado cuando la deformación aplicada en el ensayo es alta. A deformaciones bajas, la resistencia a fatiga de las mezclas se reduce significativamente, especialmente en el caso de las mezclas 1A y 5B.
- Los resultados obtenidos demuestran la reciclabilidad de las mezclas bituminosas experimentales (mezclas 1A y 1B). Mezclas compuestas en más de un 35% de su volumen por fresado generado artificialmente en laboratorio a partir de las mezclas experimentales (mezclas 1A y 1B), han mostrado un comportamiento adecuado, garantizando el cumplimiento de los requisitos recogidos en la normativa española (PG-3) para el tipo de mezcla desarrollado (AC 16), relativos a contenido de huecos, sensibilidad al agua y ensayo de rodadura. Sin embargo, sería necesario optimizar la fórmula de trabajo para garantizar un buen comportamiento dinámico de las mezclas, especialmente en términos de fatiga.

### 5.1.2. Conclusiones particulares del estudio de mezclas bituminosas modificadas por vía seca con polvo de neumáticos al final de su vida útil (NFU)

- La incorporación de polvo de NFU por vía seca en mezclas de tipo SDA fabricadas con un betún 50/70 convencional hace que el comportamiento de estas sea similar al de una mezcla convencional análoga (mismo contenido de ligante y misma composición de áridos) fabricada con un betún modificado con polímeros de tipo PmB 45/80-65.

Estos resultados ponen de manifiesto el gran potencial de esta técnica, especialmente si tenemos en cuenta que la fórmula de trabajo no ha sido adaptada para optimizar el comportamiento de las mezclas, por ejemplo, aumentando el contenido de betún o ajustando la granulometría para tener en cuenta la presencia de las partículas de caucho.

- Se ha comprobado que los resultados de la mezcla modificada por vía seca con partículas de tipo CR-B (producidas mediante molido a temperatura ambiente) se ven más afectados por el tiempo de acondicionamiento que los resultados de la mezcla modificada con partículas de tipo CR-A (producidas mediante molido a temperatura ambiente y sometidas a un tratamiento específico con polímeros). Es por tanto el tipo de partícula una variable fundamental en el diseño de este tipo de mezclas.
- La interacción entre el polvo de neumático y el betún provoca que la viscosidad de este último se incremente. Este incremento, así como la variación que la viscosidad experimenta en función del tiempo de acondicionamiento, dependen no solo del tipo sino también de cantidad de polvo de neumático utilizada. Muestras de betún con un contenido de polvo de neumático del 15% del peso del conjunto presentan mayor viscosidad para cualquier tiempo de acondicionamiento (resultados hasta 5 horas) que muestras con un contenido del 10%.
- La viscosidad del conjunto de betún y polvo de NFU aumenta a medida que se incrementa el tiempo de acondicionamiento hasta alcanzar un valor máximo, momento en el cual comienza a disminuir. Esta variación en la viscosidad será más importante y ocurrirá más o menos rápido en función tanto del tipo como del contenido de polvo de NFU. En este caso particular, las muestras con un 15% de polvo de NFU de tipo CR-B son las que muestran mayor incremento en la viscosidad y las que más rápido alcanzan el valor máximo.

- La influencia del tiempo de acondicionamiento se manifiesta claramente en los resultados del ensayo Marshall. Los resultados de este ensayo, especialmente en las mezclas modificadas con CR-B, indican un incremento en la rigidez de la mezcla a medida que se incrementa el tiempo de acondicionamiento. Por su parte, el tiempo de acondicionamiento no ha mostrado tener una importancia significativa ni en el contenido de huecos de las mezclas ni en el resultado del ensayo de sensibilidad al agua, independientemente del tipo de polvo de NFU utilizado.
- La influencia del tiempo de acondicionamiento también se manifiesta en las imágenes tomadas con el microscopio electrónico de barrido ambiental (ESEM). Estas imágenes muestran cómo las partículas de tipo CR-B están más integradas dentro del mástico de la mezcla cuando el tiempo de acondicionamiento aplicado es de 120 minutos que cuando ese tiempo es de 60 minutos. En las mezclas con 60 minutos de tiempo de acondicionamiento es todavía posible distinguir con cierta claridad los bordes de las partículas de caucho.
- Entre los dos distintos tipos de partículas de polvo de NFU utilizados es difícil establecer cual presenta mayores beneficios para la mezcla. En términos de comportamiento mecánico, para los ensayos ejecutados, todas las mezclas presentan un comportamiento adecuado independientemente del tipo de partícula utilizado.

Sin embargo, la utilización de partículas de tipo CR-A (producidas mediante molido a temperatura ambiente y sometidas a un tratamiento específico con polímeros) presentan la ventaja de que, debido a la menor susceptibilidad al tiempo de acondicionamiento mostrada por las mezclas resultantes, estas son menos restrictivas en la fase de producción en lo que a tiempos de fabricación, transporte y puesta en obra se refiere.

- La incorporación de partículas de caucho por vía seca en la mezcla hace que esta sea menos susceptible al envejecimiento. Este comportamiento se manifiesta en los valores de cociente Marshall, los cuales indican que la rigidez de la mezcla apenas varía por efecto del envejecimiento.

Sin embargo, estos resultados no se manifiestan así en las muestras de betún recuperado en las distintas fases de envejecimiento, donde el valor del módulo complejo de estos betunes muestra un incremento en la rigidez tras el envejecimiento artificial a largo plazo de la mezcla.

Estos resultados contradictorios ponen en evidencia la necesidad de profundizar en este estudio. Se recomienda evaluar la influencia del envejecimiento en la rigidez de la mezcla a través de ensayos específicos (ej. ensayo de flexión en cuatro puntos), siendo muy recomendable evaluar también la evolución de la resistencia de las mezclas ante esfuerzos de fatiga.

- El efecto del aditivo rejuvenecedor sobre las propiedades de los betunes modificados con polvo de neumático parece estar condicionado por el tipo de partícula utilizado. En este caso, el betún de la mezcla modificada con CR-B ha mostrado una reducción notable de su rigidez tras la incorporación del aditivo. Sin embargo, la incorporación del aditivo apenas provoca ningún cambio sobre el betún de la mezcla modificada con CR-A.

En cualquier caso, las mezclas recicladas (mezcla envejecida artificialmente y re-amasada tras la incorporación de rejuvenecedor en una dosis del 5% del peso del betún) han mostrado un comportamiento en todos los ensayos ejecutados que cumple con los requisitos normativos pertinentes, independientemente del tipo de partícula utilizado.

## **CHAPTER V - CONCLUSIONS**



## **5.1. CONCLUSIONS**

The technical feasibility of asphalt mixtures composed of very high rates of alternative materials was proved at the laboratory level.

It was confirmed that the use of RAP in concentrations between 20 and 40% of the volume of the sample with small incorporation of specific additives allows a reduction in the amounts of conventional aggregates and virgin bitumen used in a mixture.

Moreover, the use of industrial by-products seems to be a good alternative to natural aggregates. By using these materials, it is possible to design mixtures that fulfil the technical requirements established by current regulations, achieving a very important reduction regarding the natural resources used as well.

Concerning the use of crumb rubber from wasted tyres, conventional asphalt mixtures modified by the dry process achieved a mechanical performance similar to conventional ones modified with polymeric modified bitumen.

### **5.1.1. Particular conclusions of the study on the use of alternative materials in asphalt mixtures**

- Mixtures designed with a replacement of the aggregates between 80 and 98% have shown adequate laboratory performance and guarantee compliance with the prescriptions marked by regulations (PG-3). It was evaluated that these mixtures meet the requirements relating to air void content, water sensitivity test and wheel tracking test for the most restrictive climatic and traffic conditions.
- The combined use of RAP and additives can significantly reduce the amount of bitumen used in asphalt mixture production, while maintaining an adequate mixture performance. It was confirmed that asphalt mixtures with RAP percentages between 20 and 40% of the mix volume allowed reductions of 30-40% of the virgin binder required.
- The Electric Arc Furnace (EAF) slag used in this research is an excellent alternative to be used as coarse fraction of the aggregate in asphalt concrete. This material can be used in any type of asphalt concrete listed in the Spanish regulations (PG-3, article 542) and for all weather and traffic conditions. Its shape and abrasion resistance (LA=18) make this material suitable for this use. Asphalt mixtures incorporating this material show optimal performance, especially in terms of resistance to permanent deformation.

- The Basic Oxygen Furnace (BOF) slag used in this research was found limited in its use in asphalt concrete for wearing courses by the result of the polished stone value (PSV=52), so that its use is only possible when the traffic does not exceed category T1 (Spanish regulation). Moreover, it is an aggregate suitable for use in the coarse fraction of the aggregate thanks to both its shape and adequate abrasion resistance (LA=20). Asphalt mixtures incorporating this material show an optimal performance as well, especially in terms of rutting performance.
- It was observed that the use of foundry sand as part of the fine fraction requires more amount bitumen compared to limestone. This result is associated with a higher absorption of this by-product. Nevertheless, as far as mechanical tests are concerned, the incorporation of this foundry sand in the asphalt mix has not caused any inconvenience for the mix in terms of its mechanical performance.
- It was found that the RAP used in this investigation presents its main constraint to be used for wearing course due to the characteristics of its coarse aggregate. With a Los Angeles coefficient of 23 and a polished stone value of 46, Spanish regulations (PG-3) would only allow its use in the wearing course when traffic does not exceed category T32. For lower layers, as far as the characteristics of the aggregate are concerned, this RAP could be used without any restriction.
- The use of the rejuvenator (additive A) in RAP bitumen samples (2.5% by weight of bitumen) results in a significant reduction in the stiffness of the bitumen, while reducing its elastic recovery potential and improving its performance under fatigue stresses.

The use of the fluxing agent (additive B) in RAP bitumen samples (2.5% by weight of the bitumen) causes a similar effect to that produced by the rejuvenator. However, the improvement in fatigue performance is not as great when this additive is used.

- Between the two additives used, the one considered as a rejuvenator (additive A) has shown a better performance in certain aspects that position it as a better alternative to the fluxing agent (additive B). The main difference between using one or the other lies in the fatigue behaviour of both bitumen samples and asphalt mixtures, where the use of additive A allows better results to be obtained. For the rest of the laboratory tests carry out there are no significant differences in the performance of the mixtures regardless of the additive used.

- The experimental asphalt mixtures (mixtures 1A, 1B, 5A and 5B) were found stiffer than the conventional reference one. Although with some variability in the results, the fatigue performance of these experimental mixtures is adequate when the deformation applied in the test is high. At low deformations, the fatigue performance of the mixtures is significantly reduced, especially in the case of mixtures 1A and 5B.
- The results obtained in this study corroborated the recyclability of the experimental asphalt mixes (mixtures 1A and 1B). Asphalt mixtures with more than 35% vol. RAP artificially generated in the laboratory from the experimental mixtures (mixtures 1A and 1B) were prepared. These mixtures have shown a satisfactory laboratory performance, guaranteeing compliance with the requirements of Spanish regulations (PG-3) for the type of mixture analysed (AC 16). In this sense, they met the requirements relating to air void content, water sensitivity test and wheel tracking test for the most restrictive climatic and traffic conditions. However, it would be necessary an optimization of the mix design to ensure good dynamic performance of the mixes, especially in terms of fatigue.

### **5.1.2. Particular conclusions of the study of crumb rubber modified asphalt concrete using the dry process**

- The incorporation of crumb rubber by dry process in semi-dense asphalt mixtures (SDA) prepared with a conventional bitumen 50/70 leads to a performance similar to that of an analogous conventional mixture (same binder content and same aggregate composition) with a conventional polymeric modified bitumen (PmB 45/80-65).

These results show the great potential of the dry process once the design of these CR modified mixtures are optimized, for example by increasing the bitumen content or adjusting the particle size to take into account the presence of rubber particles.

- It has been shown that the results of the mixture modified with CR-B (produced by ambient grinding) are more affected by conditioning time than the results of the mixture modified with CR-A (produced by ambient grinding and subjected to a specific treatment with polymers). The type of particle is therefore a fundamental variable in the design of this type of mixtures.

- The interaction between crumb rubber and bitumen causes the increase of the bitumen's viscosity. It has been observed that the conditioning time as well as the type and the amount of crumb rubber significantly affect the viscosity properties. Bitumen samples with 15% crumb rubber content have higher viscosity for any conditioning time (results up to 5 hours) than samples with 10% crumb rubber content.
- The viscosity of crumb rubber modified bitumen tends to increase as the conditioning time increases until it reaches a maximum value, at which point it begins to decrease. This behaviour depends fundamentally on the type and content of crumb rubber used. In this case, samples with 15% CR-B content show faster variation and reach a higher maximum viscosity value.
- The influence of conditioning time is clearly manifested in the Marshall test results. The results of this test, especially in mixtures modified with CR-B, indicate an increase in the stiffness of the mixture as the conditioning time increases. On the other hand, conditioning time has not been shown to be of significant importance either in the air void content of the mixtures or in the result of the water sensitivity test, regardless of the type of CR powder used.
- ESEM analysis on asphalt concrete samples modified with CR confirmed microstructure changes linked to the conditioning time. Crumb rubber particles were clearly distinguished in samples obtained after 60 minutes of conditioning time whereas, after 120 minutes, no clear particle could be found within the mastic. This fact indicates that CR particles were totally digested.
- No clear conclusion can be drawn regarding the benefits of the modification process of CR-A in comparison to CR-B. In terms of mechanical performance, for the laboratory tests performed, all the mixtures have an adequate performance regardless of the type of particle used.

However, asphalt mixtures modified with CR-A particles were found to be less susceptible to conditioning time which could lead to better characteristics concerning final transport, laying and compaction times.

- It could be observed that asphalt mixtures modified with crumb rubber using the dry method were less susceptible to ageing. This behaviour was found in the Marshall quotient values, which indicate that the stiffness of the mixture hardly varies due to the effect of ageing.

Nevertheless, the value of the complex modulus of samples of recovered bitumen in the different ageing stages show an increase in stiffness after the artificial ageing of the mixture.

These opposing results highlight the need for further studies to clarify the effect of ageing on CR modified mixtures. Therefore, it is recommended to evaluate the influence of ageing on the stiffness of the mixture through specific tests (e.g. four-point bending test), as well as the fatigue performance of these types of mixtures.

- Finally, the rejuvenator effect on the properties of bitumen recovered from crumb rubber modified asphalt mixtures seems to be conditioned by the type of crumb rubber used. In this case, the bitumen of the CR-B modified mixture has shown a noticeable reduction in stiffness after incorporation of the additive. However, the incorporation of the additive hardly causes any change to the bitumen of the CR-A modified mixture.

In any case, recycled mixtures (mixture artificially aged and re-mixed after incorporation of rejuvenator in a dose of 5% of the weight of bitumen) have shown a performance that meets the requirements fixed by the technical standards, regardless of the type of particle used.



## **CAPÍTULO VI – LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS**



## 6.1. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS

A partir de la investigación recogida en esta tesis doctoral surgen diferentes ideas para complementar y profundizar el trabajo realizado. Algunas de estas ideas se muestran a continuación.

- Estudiar el ciclo de vida completo de las mezclas desarrolladas, analizando los diferentes impactos en su conjunto de forma que pueda cuantificarse de una manera más objetiva los beneficios conseguidos al reemplazar los recursos naturales por las diferentes alternativas propuestas.
- Optimizar la tasa de sustitución de los áridos por materiales alternativos en el caso de no utilizar fresado (mezcla 6). Parece interesante profundizar en el estudio de este tipo de mezclas de forma que, utilizando la misma cantidad de betún que una mezcla convencional, se consiga un equilibrio entre sustitución de los áridos y comportamiento mecánico de la mezcla.
- A la vista de los resultados, se hace necesario profundizar en el estudio del comportamiento a fatiga de las mezclas bituminosas desarrolladas. Es necesario comprender los motivos que hacen que en este ensayo los resultados de las mezclas experimentales no muestren a niveles de deformación bajos un comportamiento similar al de la mezcla de referencia.
- Desarrollar una metodología de caracterización del fresado que facilite su incorporación a la mezcla durante la fase de diseño. Identificar las propiedades fundamentales y relacionarlas con el resto de variables, como puede ser el tipo de betún virgen, la necesidad o no de utilizar aditivos o el contenido máximo de fresado admisible, por ejemplo, podría ser un primer paso para facilitar el diseño y favorecer la incorporación de fresado en las mezclas bituminosas.
- Establecer una metodología clara que permita determinar la aptitud de materiales alternativos para su uso en mezclas bituminosas. Pensando en la gran variedad de residuos que pueden ser utilizados como árido, establecer una metodología clara que permita determinar si estos son o no aptos para este uso en particular, facilitaría la incorporación de estos materiales en el mercado de las mezclas bituminosas.
- Profundizar en el estudio del efecto causado por los aditivos rejuvenecedores sobre las propiedades del betún, tratando de establecer una metodología que permita, de la forma más sencilla posible, establecer la cantidad de aditivo a utilizar en función de las características de los betunes utilizados.

- Explorar diferentes alternativas a los aditivos utilizados, valorando la posibilidad de utilizar residuos de difícil reciclaje, y no solo con el objetivo de actuar como rejuvenecedor, sino también pensando en buscar alternativas que permitan reducir la cantidad de betún a utilizar.
- Profundizar en el estudio de las mezclas modificadas con polvo de neumático por vía seca, analizando aspectos fundamentales como son el comportamiento ante deformación permanente o el comportamiento ante el fallo por fatiga.
- Explorar las diferentes posibilidades relacionadas con la incorporación del polvo de caucho por vía seca en las mezclas bituminosas, de forma que se optimice su rendimiento. Destacar en este sentido el estudio de las posibles adaptaciones que puedan hacerse en la fórmula de trabajo buscando una mejor integración del caucho y una optimización del comportamiento mecánico de la mezcla.
- Estudiar alternativas para reducir el tiempo y la temperatura utilizados durante la fase de acondicionamiento de las mezclas modificadas con polvo de NFU mediante el método por vía seca. Conseguir reducir ambos parámetros permitiría abaratar considerablemente los costes de producción y mejorar sustancialmente en términos de consumo energético y contaminación.
- A la vista de que los resultados obtenidos en las mezclas modificadas con polvo de neumático indican una menor susceptibilidad al envejecimiento, se abre la posibilidad de profundizar en el estudio de este comportamiento, de forma que a través de diferentes ensayos pueda relacionarse lo que le ocurre al betún durante el proceso de envejecimiento, y cómo esto se refleja en el comportamiento de la mezcla.

## **CAPÍTULO VII - REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**



## 7.1. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] W.F. Laurance, G.R. Clements, S. Sloan, C.S. O’Connell, N.D. Mueller, M. Goosem, O. Venter, D.P. Edwards, B. Phalan, A. Balmford, R. Van Der Ree, I.B. Arrea, A global strategy for road building, *Nature*. 513 (2014) 229–232, <https://doi.org/10.1038/nature13717>
- [2] Ministerio de Fomento. Gobierno de España. Catálogo y evolución de la red de carreteras. <https://www.fomento.gob.es/carreteras/catalogo-y-evolucion-de-la-red-de-carreteras/evolucion-desde-1970> (accedido 28/05/2019).
- [3] Comisión Europea, “Cerrar el círculo: un plan de acción de la UE para la economía circular”. (2015). [online] [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:8a8ef5e8-99a0-11e5-b3b7-01aa75ed71a1.0011.02/DOC\\_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:8a8ef5e8-99a0-11e5-b3b7-01aa75ed71a1.0011.02/DOC_1&format=PDF) (accedido 01/03/2019).
- [4] Fundación para la Economía Circular, “Economía Circular”. [online] [https://economiecircular.org/wp/?page\\_id=62](https://economiecircular.org/wp/?page_id=62) (accedido 01/06/2019).
- [5] Ministerio para la transición ecológica. Gobierno de España, “Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022”. [online] [https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/planes-y-estrategias/pemaraprobado6noviembrecondae\\_tcm30-170428.pdf](https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/planes-y-estrategias/pemaraprobado6noviembrecondae_tcm30-170428.pdf) (accedido 02/06/2019).
- [6] Comisión Europea, “Hoja de ruta hacia una Europa eficiente en el uso de los recursos”. (2011). [online] <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0571:FIN:ES:PDF> (accedido 01/03/2019).
- [7] E. Scibilia, “Environmental Impact and Sustainability in Aggregate Production and Use”, en: G. Lollino, A. Manconi, F. Guzzetti, M. Culshaw, P. Bobrowsky, F. Luino (Eds.), “Engineering Geology for Society and Territory”, Springer International Publishing Switzerland. (2014).
- [8] W. Langer, “Sustainability of aggregates in construction”, Second Edi, Elsevier Ltd. (2009). <https://doi.org/10.1533/9781845695842.1>
- [9] Asociación Nacional de Empresarios Fabricantes de Áridos (ANEFA), “Informe de situación económica sectorial”. (2018). [online] <http://www.aridos.org/wp-content/uploads/2018/10/Informe-sectorial-Asamblea-General-ANEFA-2018.pdf> (accedido 01/03/2019).
- [10] European Asphalt Pavement Association (EAPA), “Asphalt in figures 2017”. (2017). [online] [https://eapa.org/wp-content/uploads/2018/12/AIF\\_2017.pdf](https://eapa.org/wp-content/uploads/2018/12/AIF_2017.pdf) (accedido 01/03/2019).
- [11] M. Zaumanis, R.B. Mallick, R. Frank, “100% recycled hot mix asphalt: A review and analysis”, *Resour. Conserv. Recycl.* 92 (2014) 230–245. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.07.007>

- [12] SIGNUS Ecovalor, “Mezclas asfálticas con polvo de neumático, estudio económico”. [online] <https://www.signus.es/mezclas-asfalticas-con-polvo-de-neumatico/economico.html> (accedido 02/06/2019).
- [13] EUROSLAG, “Ferrous slag, general Information”. [online] <https://www.euroslag.com/products/> (accedido 01/03/2019).
- [14] EUROSLAG, “Statistics 2016”. [online] <https://www.euroslag.com/wp-content/uploads/2019/01/Statistics-2016.pdf> (accedido 01/03/2019).
- [15] LIFE ECO-SANDBILL - Spend foundry sand valorisation in construction sector through the validation of high-performance applications. [proyecto] [http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=search.dspPage&n\\_proj\\_id=5767&docType=pdf](http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=search.dspPage&n_proj_id=5767&docType=pdf) (accedido 01/03/2019).
- [16] Ministerio de Fomento. Gobierno de España. “Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3)”. [online] <https://www.fomento.gob.es/carreteras/normativa-tecnica/17-pliegos-de-prescripciones-tecnicas-generales> (accedido 02/06/2019)
- [17] M. Frías, J.T. San-José, I. Vegas, “Árido siderúrgico en hormigones: proceso de envejecimiento y su efecto en compuestos potencialmente expansivos”, Mater. construcción. 60 (2010) 33-66.
- [18] Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), “Escorias de acería de horno de arco eléctrico”. (2011). [online] <http://www.cedex.es/NR/rdonlyres/22980D5E-377B-4697-AEFE-CE897A68963D/119858/ESCORIASDEACERIADEHORNODEARCOELECTRICO.pdf> (accedido 01/03/2019).
- [19] M. Skaf, J.M. Manso, Á. Aragón, J.A. Fuente-Alonso, V. Ortega-López, “EAF slag in asphalt mixes: A brief review of its possible re-use”, Resour. Conserv. Recycl. 120 (2017) 176-185. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.12.009>
- [20] M. Etxeberria, C. Pacheco, J.M. Meneses, I. Berridi, “Properties of concrete using metallurgical industrial by-products as aggregates”, Constr. Build. Mater. 24 (2010) 1594-1600. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.02.034>
- [21] A.I. Fonseca Miguel, C. Gascón, J.L. Ruiz de Ojeda, J.A. Navarro, A. Ruiz Rubio, “Utilización del árido siderúrgico en el País Vasco”, Carreteras. (2013) 50-63. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4162840> (accedido 01/03/2019).
- [22] M.M. Losanez, “Aprovechamiento integral de escorias blancas y negras de acería eléctrica en construcción y obra civil”, (2006) <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=212355> (accedido 01/03/2019).
- [23] J.M. Manso, J.J. Gonzalez, J.A. Polanco, “Electric Arc Furnace Slag in Concrete”, J. Mater. Civ. Eng. 16 (2004) 639-645. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2004\)16:6\(639\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:6(639))

- [24] T. Sofilić, V. Merle, A. Rastovčan-mioč, M. Ćosić, U. Sofilić, “Steel slag instead natural aggregate in asphalt mixture”, *Arch. Metall. Mater.* 55 (2010) 657-668.
- [25] H. Ziari, S. Nowbakht, S. Rezaei, A. Mahboob, “Laboratory Investigation of Fatigue Characteristics of Asphalt Mixtures with Steel Slag Aggregates”, *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2015 (2015). <http://dx.doi.org/10.1155/2015/623245>
- [26] H. Ziari, M.M. Khabiri, “Preventive maintenance of flexible pavement and mechanical properties of steel slag asphalt”, *J. Environ. Eng. Landsc. Manag.* 15 (2007) 188-192.
- [27] K.M. Khan, F. Ali, T. Sultan, S. Ahmed, A. Ahmed, “Experimental study to compare the effects of gradation, additives and filler materials on performance of CIR mixes”, *Life Sci. J.* 10 (2013) 176-184.
- [28] M.O. Hamzah, T.C. Yi, “Effects of temperature on resilient modulus of dense asphalt mixtures incorporating steel slag subjected to short term oven ageing”, *Int. J. Civ. Environ. Struct. Constr. Archit. Eng.* 2 (2008) 1307-6892.
- [29] S. Hesami, M. Ameri, H. Goli, A. Akbari, “Laboratory investigation of moisture susceptibility of warm-mix asphalt mixtures containing steel slag aggregates”, *Int. J. Pavement Eng.* 16 (2015) 745-759.  
<https://doi.org/10.1080/10298436.2014.953502>
- [30] A. Behnood, M. Ameri, “Experimental investigation of stone matrix asphalt mixtures containing steel slag”, *Sci. Iran.* 19 (2012) 1214-1219.  
<https://doi.org/10.1016/j.scient.2012.07.007>
- [31] M. Arabani, A.R. Azarhoosh, “The effect of recycled concrete aggregate and steel slag on the dynamic properties of asphalt mixtures”, *Constr. Build. Mater.* 35 (2012) 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.036>
- [32] M. Ameri, S. Hesami, H. Goli, “Laboratory evaluation of warm mix asphalt mixtures containing electric arc furnace (EAF) steel slag”, *Constr. Build. Mater.* 49 (2013) 611-617. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.034>
- [33] U. Bagampadde, H.I. Al-Abdul Wahhab, S.A. Aiban, “Optimization of steel slag aggregates for bituminous mixes in Saudi Arabia”, *J. Mater. Civ. Eng.* 11 (1999) 30-35. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1999\)11:1\(30\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1999)11:1(30))
- [34] K. Krayushkina, O. Prentkovskis, A. Bieliatynskiy, R. Junevičius, “Use of steel slags in automobile road construction”, *Transport.* 27 (2012) 129-137.  
<https://doi.org/10.3846/16484142.2012.690093>
- [35] I.M. Asi, H.Y. Qasrawi, F.I. Shalabi, “Use of steel slag aggregate in asphalt concrete mixes”, *Can. J. Civ. Eng.* 34 (2007) 902-911.  
<https://doi.org/10.1139/107-025>

- [36] M. Pasetto, N. Baldo, “Influence of the aggregate skeleton design method on the permanent deformation resistance of stone mastic asphalt”, *Mater. Res. Innov.* 18 (2014) S3-96-S3-101. <https://doi.org/10.1179/1432891714Z.000000000588>
- [37] M. Pasetto, N. Baldo, “Electric arc furnace steel slags in «high performance» asphalt mixes: A laboratory characterisation”, en: 2006 TMS Fall Extraction and Processing Division: Sohn International Symposium. (2006).
- [38] M. Pasetto, N. Baldo, “Performance comparative analysis of stone mastic asphalts with electric arc furnace steel slag: a laboratory evaluation”, *Mater. Struct.* 45 (2012) 411-424. <https://doi.org/10.1617/s11527-011-9773-2>
- [39] M. Pasetto, N. Baldo, “Mix design and performance analysis of asphalt concretes with electric arc furnace slag”, *Constr. Build. Mater.* 25 (2011) 3458-3468. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.037>
- [40] M. Pasetto, N. Baldo, “Laboratory investigation on foamed bitumen bound mixtures made with steel slag, foundry sand, bottom ash and reclaimed asphalt pavement”, *Road Mater. Pavement Des.* 13 (2012) 691-712. <https://doi.org/10.1080/14680629.2012.742629>
- [41] M. Pasetto, N. Baldo, “Experimental evaluation of high performance base course and road base asphalt concrete with electric arc furnace steel slags”, *J. Hazard. Mater.* 181 (2010) 938-948. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.05.104>
- [42] Federal Highway Administration (FHWA), “User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction, Steel slag”. [online] <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/ssal.cfm> (accedido 07/06/2019)
- [43] Oregon Department of Transportation. “Steel Slag in Hot Mix Asphalt Concrete Final Report”. (2000). [online] <https://www.oregon.gov/ODOT/Programs/ResearchDocuments/SteelSlagHotMix.pdf> (accedido 07/06/2019)
- [44] A. Kavussi, M.J. Qazizadeh, “Fatigue characterization of asphalt mixes containing electric arc furnace (EAF) steel slag subjected to long term aging”, *Constr. Build. Mater.* 72 (2014) 158-166. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.052>
- [45] A. Kavussi, M. Jalili Qazizadeh, A. Hassani, “Fatigue behavior analysis of asphalt mixes containing electric arc furnace (EAF) steel slag”, *J. Rehab. Civ. Eng.* 3 (2016) 74-86. <https://doi.org/10.22075/JRCE.2016.364>
- [46] M.R. Hainin, G. Rusbintardjo, M.A.S. Hameed, N. Abdul Hassan, N.I. Md. Yusoff, “Utilisation of Steel Slag as an Aggregate Replacement in Porous Asphalt Mixtures”, *J. Teknol.* 69 (2014). <https://doi.org/10.11113/jt.v69.2529>

- [47] M.R. Hainin, G. Rusbintardjo, M.A. Abdul Aziz, A. Hamim, N.I. Md. Yusoff, “Laboratory Evaluation on Steel Slag as Aggregate Replacement in Stone Mastic Asphalt Mixtures”, *J. Teknol.* 65 (2013).  
<https://doi.org/doi:10.11113/jt.v65.2185>
- [48] E.A. Oluwasola, M.R. Hainin, M.M.A. Aziz, “Evaluation of asphalt mixtures incorporating electric arc furnace steel slag and copper mine tailings for road construction”, *Transp. Geotech.* 2 (2015) 47-55.  
<https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2014.09.004>
- [49] P. Ahmedzade, B. Sengoz, “Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix asphalt concrete”, *J. Hazard. Mater.* 165 (2009) 300-305.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.09.105>
- [50] H. Wen, S. Wu, S. Bhusal, “Performance Evaluation of Asphalt Mixes Containing Steel Slag Aggregate as a Measure to Resist Studded Tire Wear”, *J. Mater. Civ. Eng.* 28 (2016) 4015191. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001475](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001475)
- [51] S. Wu, Y. Xue, Q. Ye, Y. Chen, “Utilization of steel slag as aggregates for stone mastic asphalt (SMA) mixtures”, *Build. Environ.* 42 (2007) 2580-2585.  
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.06.008>
- [52] F.T. Fang, Y.C. Chong, T.T. Nyunt, S.S. Loi, “Development of environmentally sustainable pavement mix”, *Int. J. Pavement Res. Technol.* 6 (2013) 440-446. <http://www.ijprt.org.tw/reader/pdf.php?id=330>
- [53] M. Pasetto, N. Baldo, “Fatigue Performance of Asphalt Concretes with RAP Aggregates and Steel Slags”, en: 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements. (2012). [https://doi.org/10.1007/978-94-007-4566-7\\_70](https://doi.org/10.1007/978-94-007-4566-7_70)
- [54] E.A. Oluwasola, M.R. Hainin, M.M.A. Aziz, “Evaluation of rutting potential and skid resistance of hot mix asphalt incorporating electric arc furnace steel slag and copper mine tailing”, *Indian J. Eng. Mater. Sci.* 22 (2015) 550-558.  
<http://nopr.niscair.res.in/handle/123456789/33438>
- [55] I. Liapis, S. Likoydis, “Use of Electric Arc Furnace Slag in Thin Skid-Resistant Surfacing”, *Procedia - Soc. Behav. Sci.* 48 (2012) 907-918.  
<https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.06.1068>
- [56] A.F. Stock, C.M. Ibberson, I.F. Taylor, “Skidding Characteristics of Pavement Surfaces Incorporating Steel Slag Aggregates”, *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board.* 1545 (1996) 35-40. <https://doi.org/10.1177/0361198196154500105>
- [57] R. Milačič, T. Zuliani, T. Oblak, A. Mladenovič, J.Š. ančar, “Environmental Impacts of Asphalt Mixes with Electric Arc Furnace Steel Slag”, *J. Environ. Qual.* 40 (2011) 1153. <https://doi.org/10.2134/jeq2010.0516>
- [58] S. Sorlini, A. Sanzeni, L. Rondi, “Reuse of steel slag in bituminous paving mixtures”, *J. Hazard. Mater.* 209-210 (2012) 84-91.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.12.066>

- [59] Y. Xue, S. Wu, H. Hou, J. Zha, “Experimental investigation of basic oxygen furnace slag used as aggregate in asphalt mixture”, *J. Hazard. Mater.* 138 (2006) <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.02.073>
- [60] D.-H. Shen, C.-M. Wu, J.-C. Du, “Laboratory investigation of basic oxygen furnace slag for substitution of aggregate in porous asphalt mixture”, *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 453-461. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.11.001>
- [61] J. Xie, J. Chen, S. Wu, J. Lin, W. Wei, “Performance characteristics of asphalt mixture with basic oxygen furnace slag”, *Constr. Build. Mater.* 38 (2013) 796-803. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.056>
- [62] A. López-Díaz, R. Ochoa-Díaz, G.E. Grimaldo-León, “Use of BOF slag and blast furnace dust in asphalt concrete: an alternative for the construction of pavements”, *DYNA.* 85 (2018) 24-30. <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v85n206.70404>
- [63] S. Wu, Y. Xue, Q. Ye, Y. Chen, “Utilization of steel slag as aggregates for stone mastic asphalt (SMA) mixtures”, *Build. Environ.* 42 (2007) 2580-2585. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.06.008>
- [64] W. Shao-peng, Y. Wen-feng, X. Yong-jie, L. Zhen-hua, “Design and preparation of steel slag SMA”, *J. Wuhan Univ. Technol. Sci. Ed.* 18 (2003) 86-88. <https://doi.org/10.1007/BF02838469>
- [65] L.-S. Huang, Huang, Long-Sheng, “Evaluation of the Cooling and Pavement Performance of Basic Oxygen Furnace Slag Used in Asphalt Mixture”, *Appl. Sci.* 7 (2017) 1226. <https://doi.org/doi:10.3390/app7121226>
- [66] Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), “Escoria de acería LD”. (2012). [online] [http://www.cedexmateriales.es/upload/docs/es\\_ESCORIASDEACERIALDDIC2012.pdf](http://www.cedexmateriales.es/upload/docs/es_ESCORIASDEACERIALDDIC2012.pdf) (accedido 07/06/2019).
- [67] Environmental assessment of a BOF steel slag used in road construction: The ECLAIR research program. (2014). [online] <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00451174/document> (accedido 07/06/2019).
- [68] Anónimo, “Introducción al conformado por moldeo”. [online] [http://www.raquelserrano.com/wp-content/files/procesos\\_Fundicion\\_0.pdf](http://www.raquelserrano.com/wp-content/files/procesos_Fundicion_0.pdf) (accedido 07/06/2019)
- [69] P.P.O.L. Dyer, M.G. de Lima, L.M.G. Klinsky, S.A. Silva, G.J.L. Coppio, “Environmental characterization of Foundry Waste Sand (WFS) in hot mix asphalt (HMA) mixtures”, *Constr. Build. Mater.* 171 (2018) 474-484. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.151>
- [70] R. Siddique, G. Singh, “Utilization of waste foundry sand (WFS) in concrete manufacturing”, *Resour. Conserv. Recycl.* 55 (2011) 885-892. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.05.001>

- [71] Recycled Materials Resource Center, “Foundry Sand – Material description”, [online] <https://rmrc.wisc.edu/foundry-sand/> (accedido 29/05/2019).
- [72] M. Etxeberria, C. Pacheco, J.M. Meneses, I. Berridi, “Properties of concrete using metallurgical industrial by-products as aggregates”, *Constr. Build. Mater.* 24 (2010) 1594-1600. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.02.034>
- [73] R. Bakis, H. Koyuncu, A. Demirbas, “An investigation of waste foundry sand in asphalt concrete mixtures”, *Waste Manag. Res.* 24 (2006) 269-274. <https://doi.org/10.1177/0734242X06064822>
- [74] S.L. Bradshaw, C.H. Benson, E.H. Olenbush, J.S. Melton, “Using foundry sand in green infrastructure construction”, (2011). [online] <https://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/41148%28389%2924> (accedido 04/03/2019).
- [75] Federal Highway Administration (FHWA), “Foundry Sand Facts for Civil Engineers”, (2004). [online] <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/pubs/013791.pdf> (accedido 04/03/2019).
- [76] American Foundry Society (AFS), “Asphalt”. [online] <https://www.afsinc.org/asphalt> (accedido 07/06/2019).
- [77] Federal Highway Administration (FHWA), “User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction, Foundry sand”. [online] <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/fs2.cfm> (accedido 4 de marzo de 2019).
- [78] R.S. Dungan, B.D. Lee, P. Shouse, J.P. De Koff, “Saturated hydraulic conductivity of soils blended with waste foundry sands”, (2007). [online] <https://pubag.nal.usda.gov/download/9635/PDF> (accedido 04/038/2019).
- [79] Asociación Española de Fabricantes de Mezclas Asfálticas (ASEFMA), <http://www.asefma.es/la-produccion-europea-de-mezclas-asfalticas-crece-un-5-en-2017-segun-eapa/> (accedido 07/06/2019).
- [80] J.-S. Chen, C.-H. Wang, C.-C. Huang, “Engineering properties of bituminous mixtures blended with second reclaimed asphalt pavements (R2AP)”, *Road Mater. Pavement Des.* 10 (2009) 129-149. <https://doi.org/10.1080/14680629.2009.9690240>
- [81] M. Zaumanis, R.B. Mallick, R. Frank, “100% recycled hot mix asphalt: A review and analysis”, *Resour. Conserv. Recycl.* 92 (2014) 230-245. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.07.007>
- [82] N. Lee, C.-P. Chou, K.-Y. Chen, “Benefits in Energy Savings and CO2 Reduction by Using Reclaimed Asphalt Pavement”, (2012).
- [83] Q. Aurangzeb, I.L. Al-Qadi, H. Ozer, R. Yang, “Hybrid life cycle assessment for asphalt mixtures with high RAP content”, *Resour. Conserv. Recycl.* 83 (2014) <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.12.004>

- [84] T. López-Montero, R. Miró, “El envejecimiento en mezclas asfálticas”. [online] [https://www.ptcarretera.es/wp-content/uploads/2017/07/05\\_UP-cataluña\\_CT-2015\\_Final.pdf](https://www.ptcarretera.es/wp-content/uploads/2017/07/05_UP-cataluña_CT-2015_Final.pdf) (accedido 05/03/2019).
- [85] I.L. Al-Qadi, Q. Aurangzeb, S.H. Carpenter, W.J. Pine, J. Trepanier, “Impact of High RAP Content on Structural and Performance Properties of Asphalt Mixtures”, (2012). [online] <https://www.ideals.illinois.edu/bitstream/handle/2142/45810/FHWA-ICT-12-002.pdf?sequence=2&isAllowed=y> (accedido 05/03/2019).
- [86] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, “NCHRP report 752. Improved Mix Design, Evaluation, and Materials Management Practices for Hot Mix Asphalt with High Reclaimed Asphalt Pavement Content”, (2013). <https://doi.org/10.17226/22554>
- [87] J.S. Daniel, J.L. Pochily, D.M. Boisvert, “Can more reclaimed asphalt pavement be added? Study of extracted binder properties from plant-produced mixtures with up to 25% reclaimed asphalt pavement”, *Transp. Res. Rec.* (2010) 19-29. <https://doi.org/10.3141/2180-03>
- [88] A. Shah, R.S. McDaniel, G.A. Huber, V.L. Gallivan, “Investigation of properties of plant-produced reclaimed asphalt pavement mixtures”, *Transp. Res. Rec.* (2007) 103-111. <https://doi.org/10.3141/1998-13>
- [89] R. Terrel, P. Joseph, D. Fritchen, “Five year experience on low temperature performance of recycled hot mix”, *Transp Res Rec.* 1362 (1992) 56-65. <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1992/1362/1362-008.pdf>
- [90] B.J. Richard Willis, P. Turner Grant Julian Adam Joel Taylor, P. Nam Tran, P. Flavio de Goes Padula, “Effects of changing virgin binder grade and content on rap mixture properties”, (2012). [online] <https://auracing.org/research/centers/ncat/files/reports/2012/rep12-03.pdf> (accedido 05/03/2019).
- [91] W. Mogawer, T. Bennert, J.S. Daniel, R. Bonaquist, A. Austerman, A. Booshehrian, “Performance characteristics of plant produced high RAP mixtures”, *Road Mater. Pavement Des.* 13 (2012) 183-208. <https://doi.org/10.1080/14680629.2012.657070>
- [92] T. Bennert, R. Dongre, “Backcalculation Method to Determine Effective Asphalt Binder Properties of Recycled Asphalt Pavement Mixtures”, (2010) 75-84. <https://doi.org/10.3141/2179-09>
- [93] M. Sargious, N. Mushule, “Behaviour of recycled asphalt pavements at low temperatures”, *Can. J. Civ. Eng.* 18 (1991) 428-435. <https://doi.org/10.1139/91-053>
- [94] X. Shu, B. Huang, D. Vukosavljevic, “Laboratory evaluation of fatigue characteristics of recycled asphalt mixture”, *Constr. Build. Mater.* 22 (2008) 1323-1330. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.04.019>

- [95] B. Huang, G. Li, D. Vukosavljevic, X. Shu, B. Egan, “Laboratory Investigation of Mixing Hot-Mix Asphalt with Reclaimed Asphalt Pavement”, *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board.* 1929 (2005) 37-45.  
<https://doi.org/10.1177/0361198105192900105>
- [96] N.H. Tran, L. Ga, A. Taylor, P.E.R. Willis, “Effect of rejuvenator on performance properties of HMA mixtures with high RAP and RAS contents”, (2012). [online] <http://www.structural-engineering-courses.bece.auburn.edu/research/centers/ncat/files/reports/2012/rep12-05.pdf> (accedido 05/03/2019).
- [97] R. Karlsson, U. Isacson, “Material-related aspects of asphalt recycling - State-of-the-art”, *J. Mater. Civ. Eng.* 18 (2006) 81-92.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2006\)18:1\(81\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:1(81))
- [98] National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), “Recommended use of reclaimed asphalt pavement in the superpave mix design method: technician’s manual”, (2001). <http://www.national-academies.org/trb/bookstore> (accedido 05/03/2019).
- [99] A. Shah, R.S. McDaniel, G.A. Huber, V.L. Gallivan, “Investigation of Properties of Plant-Produced Reclaimed Asphalt Pavement Mixtures”, *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board.* 1998 (2007) 103-111.  
<https://doi.org/10.3141/1998-13>
- [100] National Asphalt Pavement Association (NAPA), “Asphalt Pavement Mix Production Survey, (2009).  
[https://www.asphaltpavement.org/PDFs/IS138/IS138-2010\\_RAP-RAS-WMA\\_Survey\\_Final.pdf](https://www.asphaltpavement.org/PDFs/IS138/IS138-2010_RAP-RAS-WMA_Survey_Final.pdf) (accedido 05/03/2019).
- [101] M. Zaumanis, E. Olesen, V. Haritonovs, G. Brencis, J. Smirnovs, “Laboratory evaluation of organic and chemical warm mix asphalt technologies for SMA asphalt”, *Balt. J. Road Bridg. Eng.* 7 (2012) 191-197.
- [102] M. Zaumanis, R.B. Mallick, “Review of very high-content reclaimed asphalt use in plant-produced pavements: State of the art”, *Int. J. Pavement Eng.* 16 (2015) 39-55. <https://doi.org/10.1080/10298436.2014.893331>
- [103] R.B. Mallick, K.A. O’Sullivan, M. Tao, R. Frank, “Why Not Use Rejuvenator for 100% RAP Recycling?”, (2010). <https://trid.trb.org/view/910199> (accedido 05/03/2019).
- [104] D. Kuang, Z. Feng, J. Yu, X. Chen, B. Zhou, “A new approach for evaluating rejuvenator diffusing into aged bitumen”, *J. Wuhan Univ. Technol. Sci. Ed.* 26 (2011) 43-46. <https://doi.org/10.1007/s11595-011-0164-x>
- [105] M. Zaumanis, R.B. Mallick, “Finite Element Modeling of Rejuvenator Diffusion in RAP Binder Film – Simulation of Plant Mixing Process”, *Multi-Scale Model. Charact. Infrastruct. Mater.*, (2013) 407-419.  
[https://doi.org/10.1007/978-94-007-6878-9\\_30](https://doi.org/10.1007/978-94-007-6878-9_30)

- [106] T. Baghaee Moghaddam, H. Baaj, “The use of rejuvenating agents in production of recycled hot mix asphalt: A systematic review”, *Constr. Build. Mater.* 114 (2016) 805-816. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.015>
- [107] D. Kuang, J. Yu, H. Chen, Z. Feng, R. Li, H. Yang, “Effect of rejuvenators on performance and microstructure of aged asphalt”, *J. Wuhan Univ. Technol. Mater. Sci. Ed.* 29 (2014) 341-345. <https://doi.org/10.1007/s11595-014-0918-3>
- [108] M. Simonen, T. Blomberg, T. Pellinen, J. Valtonen, “Physicochemical properties of bitumens modified with bioflux”, *Road Mater. Pavement Des.* 14 (2013) 36-48. <https://doi.org/10.1080/14680629.2012.735798>
- [109] M. Hugener, M.N. Partl, M. Morant, “Cold asphalt recycling with 100% reclaimed asphalt pavement and vegetable oil-based rejuvenators”, *Road Mater. Pavement Des.* 15 (2014) 239-258. <https://doi.org/10.1080/14680629.2013.860910>
- [110] M. Zaumanis, R.B. Mallick, R. Frank, “Evaluation of different recycling agents for restoring aged asphalt binder and performance of 100 % recycled asphalt”, *Mater. Struct. Constr.* 48 (2015) 2475-2488. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0332-5>
- [111] W.S. Mogawer, A. Austerman, R. Roque, S. Underwood, L. Mohammad, J. Zou, “Ageing and rejuvenators: evaluating their impact on high RAP mixtures fatigue cracking characteristics using advanced mechanistic models and testing methods”, *Road Mater. Pavement Des.* 16 (2015) 1-28. <https://doi.org/10.1080/14680629.2015.1076996>
- [112] S. Im, F. Zhou, R. Lee, T. Scullion, “Impacts of rejuvenators on performance and engineering properties of asphalt mixtures containing recycled materials”, *Constr. Build. Mater.* 53 (2014) 596-603. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.025>
- [113] H. Asli, E. Ahmadiania, M. Zargar, M.R. Karim, “Investigation on physical properties of waste cooking oil – Rejuvenated bitumen binder”, *Constr. Build. Mater.* 37 (2012) 398-405. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.042>
- [114] M. Zargar, E. Ahmadiania, H. Asli, M.R. Karim, “Investigation of the possibility of using waste cooking oil as a rejuvenating agent for aged bitumen”, *J. Hazard. Mater.* 233-234 (2012) 254-258. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.06.021>
- [115] Tratamiento de Neumáticos Usados, S.L. (TNU), “Memoria 2017”, (2017). [online] [https://www.tnu.es/recurso/pagina/archivo/tnu\\_memo\\_17.pdf](https://www.tnu.es/recurso/pagina/archivo/tnu_memo_17.pdf) (accedido 05/03/2019).
- [116] Ecologistas en acción, “Los neumáticos fuera de uso” [online] <https://www.ecologistasenaccion.org/?p=31369> (accedido 07/06/2019).
- [117] reRUBBER, “Environmental Impact of used tires”. [online] <http://www.rerubber.com/environmental-impact> (accedido 05/03/2019).

- [118] SIGNUS Ecovalor, “El mosquito tigre y su relación con los neumáticos usados”. [online]. <http://blog.signus.es/mosquito-tigre-y-neumaticos-usados> (accedido 05/03/2019).
- [119] European Tyre & Rubber manufactures’ association (ETRMA), “Annual report 2017”, (2017) [online] <http://www.etrma.org/uploads/Modules/Documentsmanager/20170905---etrma-annual-report-2016-17---final.pdf> (accedido 07/06/2019)
- [120] Tire and Rubber Association of Canada, “Managing End-of-Life Tires”, [online] <http://www.rubberassociation.ca/files/ELT%20Full%20Report,%202008.pdf> (accedido 07/06/2019)
- [121] SIGNUS Ecovalor, “Memoria 2017”, (2017). [https://www.signus.es/wp-content/uploads/2018/06/signus\\_memoria\\_2017.pdf](https://www.signus.es/wp-content/uploads/2018/06/signus_memoria_2017.pdf) (accedido 05/03/2019).
- [122] European Tyre & Rubber manufactures’ association (ETRMA), “End-of-life Tyre report 2015”, (2015) [online] <http://www.etrma.org/uploads/Modules/Documentsmanager/elt-report-v9a---final.pdf> (accedido 07/06/2019)
- [123] 20 minutos, “España es líder en carreteras hechas con caucho reciclado”, (2015) [online] <https://www.20minutos.es/noticia/2369742/0/espana-lider/carreteras-hechas/caucho-reciclado/> (accedido 07/06/2019)
- [124] SIGNUS Ecovalor, “20 años de mezclas asfálticas con polvo de neumático en las carreteras españolas”, (2017). <https://www.signus.es/wp-content/uploads/2018/06/Guia-mezclas-asfalticas-con-polvo-de-neumatico-en-carreteras.pdf> (accedido 05/03/2019).
- [125] Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), “Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas”, (2007). [online] [http://www.cedex.es/NR/rdonlyres/27EDCC96-7C3A-42B5-96B7-F6B87D0BD3DF/116371/Manual\\_NFU.pdf](http://www.cedex.es/NR/rdonlyres/27EDCC96-7C3A-42B5-96B7-F6B87D0BD3DF/116371/Manual_NFU.pdf) (accedido 05/03/2019).
- [126] D. Lo Presti, “Recycled Tyre Rubber Modified Bitumens for road asphalt mixtures: A literature review”, *Constr. Build. Mater.* 49 (2013) 863-881. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.007>
- [127] F.J. López-Moro, M.C. Moro, F. Hernández-Olivares, B. Witoszek-Schultz, M. Alonso-Fernández, “Microscopic analysis of the interaction between crumb rubber and bitumen in asphalt mixtures using the dry process”, *Constr. Build. Mater.* 48 (2013) 691-699. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.041>
- [128] Department of Transportation, State of California, “Feasibility of recycling rubber-modified paving materials”, (2005). [online] [https://rosap.nrl.bts.gov/view/dot/27494/dot\\_27494\\_DS1.pdf](https://rosap.nrl.bts.gov/view/dot/27494/dot_27494_DS1.pdf) (accedido 07/06/2019)

- [129] F. Moreno, M.C. Rubio, M.J. Martínez-Echevarria, “Analysis of digestion time and the crumb rubber percentage in dry-process crumb rubber modified hot bituminous mixes”, *Constr. Build. Mater.* 25 (2011) 2323-2334.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.029>
- [130] F. Moreno, M.C. Rubio, M.J. Martínez-Echevarria, “The mechanical performance of dry-process crumb rubber modified hot bituminous mixes: The influence of digestion time and crumb rubber percentage”, *Constr. Build. Mater.* 26 (2012) 466-474. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.046>
- [131] Hernández-Olivares, B. Witoszek-Schultz, M. Alonso-Fernández, C. Benito-Moro, “Rubber-modified hot-mix asphalt pavement by dry process”, *Int. J. Pavement Eng.* 10 (2009) 277–288,  
<https://doi.org/10.1080/10298430802169416>
- [132] S.E. Paje, M. Bueno, F. Terán, R. Miró, F. Pérez-Jiménez, A.H. Martínez, “Acoustic field evaluation of asphalt mixtures with crumb rubber”, *Appl. Acoust.* 71 (2010) 578–582. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2009.12.003>
- [133] A.I.B. Farouk, N.A. Hassan, M.Z.H. Mahmud, J. Mirza, R.P. Jaya, M.R. Hainin, H. Yaacob, N.I.M. Yusoff, “Effects of mixture design variables on rubber–bitumen interaction: properties of dry mixed rubberized asphalt mixture”, *Mater. Struct.* 50 (2017) 12. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0932-3>. [134]
- [134] T. Wang, F. Xiao, X. Zhu, B. Huang, J. Wang, S. Amirkhanian, “Energy consumption and environmental impact of rubberized asphalt pavement”, *J. Clean. Prod.* 180 (2018) 139–158. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.086>
- [135] H. Wang, X. Liu, P. Apostolidis, T. Scarpas, “Rheological Behavior and Its Chemical Interpretation of Crumb Rubber Modified Asphalt Containing Warm-Mix Additives”, *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board.* 2672 (2018) 337–348.  
<https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/0361198118781376>
- [136] G.D. Airey, “Use of Black Diagrams to Identify Inconsistencies in Rheological Data”, *Road Mater. Pavement Des.* 3 (2002) 403–424.  
<https://doi.org/10.1080/14680629.2002.9689933>
- [137] del Río Prat, María, “Estudio de los procesos de compactación y post-compactación de mezclas bituminosas empleando nuevos índices energéticos: aplicación a mezclas de alto módulo que contienen cantos rodados. (2011). [Tesis doctoral]
- [138] G.D. Airey, “State of the Art Report on Ageing Test Methods for Bituminous Pavement Materials”, *Int. J. Pavement Eng.* 4 (2003) 165–176.  
<https://doi.org/10.1080/1029843042000198568>
- [139] M.C. Cavalli, M. Zaumanis, E. Mazza, M.N. Partl, L.D. Poulidakos, “Effect of ageing on the mechanical and chemical properties of binder from RAP treated with bio-based rejuvenators”, *Compos. Part B Eng.* 141 (2018) 174–181.  
<https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2017.12.060>

- [140] Asphalt Institute, “Multiple Stress Creep Recovery (MSCR)”. [online] [http://www.ltrc.lsu.edu/ltrc\\_13/pdf/presentations/S43\\_Why%20the%20Multiple%20Stress%20Creep%20Recovery%20\(MSCR\)%20Test%20Should%20be%20Implemented\\_LTC2013.pdf](http://www.ltrc.lsu.edu/ltrc_13/pdf/presentations/S43_Why%20the%20Multiple%20Stress%20Creep%20Recovery%20(MSCR)%20Test%20Should%20be%20Implemented_LTC2013.pdf) (accedido 07/06/2019)
- [141] Hintz C, Velasquez R, Johnson C, Bahia H. “Modification and validation of the linear amplitude sweep test for binder fatigue”. *Transp Res Rec.* (2011) 99–106. <https://doi.org/10.3141/2207-13>.
- [142] R. Muniandy, D.H. Ismail, S. Hassim, “Performance of recycled ceramic waste as aggregates in hot mix asphalt (HMA)”, *J. Mater. Cycles Waste Manag.* 1 (2017). <https://doi.org/10.1007/s10163-017-0645-x>
- [143] A. Chomicz-Kowalska, W. Gardziejczyk, M.M. Iwański, “Moisture resistance and compactibility of asphalt concrete produced in half-warm mix asphalt technology with foamed bitumen”, *Constr. Build. Mater.* 126 (2016) 108–118. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.004>
- [144] Dantas Neto, S. A., Farias, M. M., Pais, J. C., Pereira, P. A. A., Sousa, J. B., “Influence of crumb rubber and digestion time on the asphalt rubber binders”. *Road Mater. Pavement Des.* 7(2) (2006) 131–148. <http://doi.org/10.1080/14680629.2006.9690030>
- [145] Loderer, C., Partl, M. N., Poulidakos, L. D., “Effect of crumb rubber production technology on performance of modified bitumen”. *Constr. Build. Mater.* 191 (2018) 1159–1171. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.046>
- [146] Lo Presti, D., Airey G., “Tyre rubber-modified bitumens development: the effect of varying processing conditions”. *Road Mater. Pavement Des.* 14:4 (2013) 888-900. <https://doi.org/10.1080/14680629.2013.837837>
- [147] Steiner, D. Hofko, B. Blab, R., “Effect of air void content and repeated testing on stiffness of asphalt mix specimen”. *7th Civil Engineering Conference in the Asian Region (CECAR 7)* (2016) [online] <https://pdfs.semanticscholar.org/328a/fcdc1a5acbacad1f3a76ae6bd7785b579d50.pdf> (accedido 07/06/2019)

## 7.2. NORMAS UTILIZADAS

EN 933-2:1996	Ensayo para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 2: Determinación de la granulometría de las partículas. Tamices de ensayo, tamaño nominal de las aberturas.
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.
EN 933-5:1999	Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 5: Determinación del porcentaje de caras de fractura de las partículas de árido grueso.
EN 933-8:2012	Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 8: Evaluación de los finos. Ensayo del equivalente de arena.
EN 933-9:2010	Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 9: Evaluación de los finos. Ensayo de azul de metileno.
EN 1744-1:2010	Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: Análisis químico.
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.
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.
EN 1097-8:2010	Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 8: Determinación del coeficiente de pulimento acelerado.
EN 12457-4:2003	Caracterización de residuos. Lixiviación. Ensayo de conformidad para la lixiviación de residuos granulares y lodos. Parte 4: Ensayo por lotes de una etapa con una relación líquido-sólido de 10 l/kg para materiales con un tamaño de partícula inferior a 10 mm (con o sin reducción de tamaño)
EN 12697-1:2013	Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 1: Contenido de ligante soluble.
EN 12697-5:2010	Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 5: Determinación de la densidad máxima.

EN 12697-6:2012	Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 6: Determinación de la densidad aparente de probetas bituminosas.
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.
EN 12697-10:2003	Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezcla bituminosa en caliente. Parte 10: Compactibilidad.
EN 12697-12:2009	Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 12: Determinación de la sensibilidad al agua de las probetas de mezcla bituminosa.
EN 12697-22:2008	Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 22: Ensayo de rodadura.
EN 12697-24:2013	Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 24: Resistencia a la fatiga.
EN 12697-26:2012	Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 26: Rigidez.
EN 12697-30:2013	Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 30: Preparación de probetas mediante compactador de impactos.
EN 12697-33:2006	Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 33: Elaboración de probetas con compactador de placa.
EN 12697-34:2013	Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 34: Ensayo Marshall.
EN 13108-20:2007	Mezclas bituminosas. Especificaciones de materiales. Parte 20: Ensayos de tipo.
EN 13302:2003	Betunes y ligantes bituminosos. Determinación de la viscosidad dinámica de los ligantes bituminosos usando un viscosímetro de rotación de aguja.
EN 1426:2015	Betunes y ligantes bituminosos. Determinación de la penetración con aguja.
EN 1427:2015	Betunes y ligantes bituminosos. Determinación del punto de reblandecimiento. Método del anillo y bola
NLT-361/91	Determinación del grado de envejecimiento en escorias de acería
SNR 640 436:2013	Semidichtes Mischgut und Deckschichten Festlegungen, Anforderungen, Konzeption und Ausführung