



Universidad de Jaén

Escuela de Doctorado

TESIS DOCTORAL

**DESARROLLO DE MEZCLAS
BITUMINOSAS PARA CONSERVACIÓN
DE CARRETERAS CON ESCORIAS DE
ACERÍA**

**PRESENTADA POR:
JUAN MARÍA TERRONES SAETA**

**DIRIGIDA POR:
DR. D. FRANCISCO A. CORPAS IGLESIAS
DRA. DÑA. CARMEN MARTÍNEZ GARCÍA**

LINARES, NOVIEMBRE DE 2020



Universidad de Jaén

Escuela de Doctorado

TESIS DOCTORAL

**DESARROLLO DE MEZCLAS BITUMINOSAS PARA
CONSERVACIÓN DE CARRETERAS CON ESCORIAS
DE ACERÍA**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR
PRESENTADA POR

JUAN MARÍA TERRONES SAETA

Directores:

Dr. Francisco Antonio Corpas Iglesias.

Dra. Carmen Martínez García.

Departamento: Ingeniería Química, Ambiental y de los Materiales.
Escuela Politécnica Superior de Linares

A Dios...

Agradecimientos

Primeramente quería agradecer la ayuda infinita para la realización de este trabajo a mi Director de tesis Francisco Antonio Corpas Iglesias, ha sido mi guía y apoyo en el mundo profesional, investigador y científico. A él le debo todo lo que he conseguido en estos años desde la finalización de mis estudios.

Seguidamente agradezco a mi Directora de tesis Carmen Martínez García por siempre brindarme ayuda y mostrarme el camino correcto. Su responsabilidad, trabajo y conocimiento son ejemplos para mí. Igualmente, agradezco a mi Tutor Francisco Javier Iglesias Godino, ya que ha supuesto una persona imprescindible en mi carrera investigadora; sus consejos, ánimos y ayuda han sido esenciales para mi vida profesional.

Obviamente, a mi amigo, compañero y hermano Jorge Suárez Macías. Él ha sido el pilar de apoyo más fuerte que he tenido en los últimos años y es imprescindible en mi vida diaria, personal, investigadora y empresarial. Sin él nunca podría haber llegado a realizar esta tesis.

A mis padres, Fernando e Isabel, por apoyarme siempre en cualquier situación y sentirme respaldado por ellos. Ellos son los que me han enseñado la valía del esfuerzo, el trabajo y la honestidad. La confianza que siempre han depositado en mí y ante cualquier situación, solo puede darla un padre y una madre. Por supuesto a mis hermanos, Salvador y Antonia, por ser el espejo en el que reflejarme y representar los mejores valores personales que pueden encontrarse en un ser humano.

A todos los compañeros del grupo de investigación, profesores, becarios y alumnos que han estado en el laboratorio. Todos han dejado huella en mí y de todos he aprendido algo.

A mi profesor Alfredo Clemente, que aunque no puedas ver ni leer esta tesis como te hubiera gustado por este desgraciado virus, sé que desde algún sitio estarás orgulloso de mi.

Gracias a todos.

Resumen

El sector de la construcción es uno de los sectores más demandantes de materias primas que existen en la actualidad. Más concretamente, la construcción de carreteras es una actividad que supone un importante consumo de materiales vírgenes y una gran emisión de gases de efecto invernadero por los procesos de producción. No obstante, la construcción de carreteras es una actividad esencial que reporta diversos beneficios económicos y sociales a la población. Por lo tanto, deben promoverse nuevos materiales que satisfagan las necesidades de las infraestructuras pero que no reporten un alto costo ambiental.

Esta tendencia está encuadrada dentro de la nueva económica circular, motivada principalmente por una mayor conciencia medioambiental de la población y unas normativas ambientales más estrictas. Basándose en lo comentado, y con la idea de crear materiales sostenibles para la conservación y mantenimiento de las carreteras, en esta tesis se plantea el uso de dos subproductos industriales que se producen en gran cantidad, las escorias de horno de arco eléctrico y las escorias de horno cuchara. Ambos subproductos derivan de la industria siderúrgica de la producción del acero a partir de chatarra y poseen unas características muy particulares que son interesantes para su aplicación en mezclas bituminosas.

Con el fin de desarrollar mezclas bituminosas dedicadas a la conservación de carreteras y que incorporen ambos subproductos, en esta tesis se llevó a cabo una metodología clara y objetiva en la cual se identifican las fortalezas de los materiales, así como los posibles puntos débiles.

Para ello, primeramente se caracterizaron las escorias de horno de arco eléctrico y de horno cuchara para la determinación de sus propiedades físicas y su composición química. De esta forma pudo conocerse las bondades de los materiales y sus posibles debilidades, con el fin de incorporarlos en nuevas mezclas bituminosas.

Con esta hipótesis inicial, se procedió a ejecutar tres tipos de mezclas bituminosas en las que la incorporación de los residuos produciría beneficios a las características finales del material.

Primeramente se desarrolló un firme reciclado in situ con emulsión bituminosa y escoria de horno cuchara. En este tipo de mezcla, de bajo impacto medio ambiental, se utilizan las escorias de horno cuchara como árido de aportación para poder así obtener una resistencia superior a la esperada. Esta propiedad resistente se consiguió gracias a la composición química de las escorias detalladas ya que, como se ha referenciado en diversas investigaciones, posee propiedades cementantes.

Por otra parte, y con el fin de aprovechar al máximo las características resistentes y texturales de las escorias de horno de arco eléctrico, se ejecutaron asfaltos porosos con emulsión bituminosa, escorias de horno de arco eléctrico y fibras de celulosa. Estas mezclas de granulometría discontinua obtienen sus resistencias a compresión por el esqueleto mineral proporcionado por las escorias de horno de arco eléctrico, así como su resistencia a tracción por el mastic conformado con las escorias de menor tamaño, el betún de la emulsión y las fibras de celulosa.

A su vez, y dada la resistencia al pulimiento de las escorias de horno de arco eléctrico, se desarrolló un tratamiento superficial para pavimentos que habían perdido sus características adherentes con las escorias mencionadas y emulsión bituminosa. Este es un tratamiento rápido y económico de aplicar que mejora la calidad de los pavimentos sin rugosidad superficial.

Finalmente, se ejecutaron mezclas bituminosas tipo SMA (Stone Mastic Asphalt) para carreteras de tráfico elevado con escorias de horno de arco eléctrico como árido fino y grueso, escorias de horno cuchara como filler y fibras de celulosa. Este tipo de mezcla de alta calidad supone la prueba más importante de las escorias detalladas, ya que para su conformado se utilizan materiales de alta calidad y, en consecuencia, se cuantifica en profundidad la bondad de las escorias.

Los ensayos de las diferentes mezclas bituminosas, característicos de cada mezcla y según la función que desempeñan, reflejaron unos resultados claros y objetivos que han sido publicados en revistas internacionales. Por una parte el firme reciclado con emulsión bituminosa consiguió una resistencia superior a la fijada por la normativa gracias a la incorporación de un 10% de escorias de horno cuchara. El asfalto poroso con emulsión bituminosa y escorias de horno de arco eléctrico obtuvo un elevado porcentaje

de huecos y una excelente resistencia a la fragmentación. Estas propiedades se consiguieron por el aumento significativo de betún en las mezclas gracias a la incorporación de fibras desechadas de la industria del papel y la absorción de las escorias de horno de arco eléctrico. No obstante, no se produjeron problemas de deformaciones plásticas como así lo determinó el ensayo Marshall. A su vez, el tratamiento superficial con escorias de horno de arco eléctrico mostró valores aceptables de cohesión y adherencia con la capa inferior, así como una baja pérdida de partículas por la abrasión del tráfico. Finalmente, las mezclas SMA (Stone Mastic Asphalt) con escorias de horno de arco eléctrico y escorias de horno cuchara reflejaron un excelente comportamiento de las escorias de horno de arco eléctrico como árido, así como unas propiedades cementantes de las escorias de horno cuchara. Estas cualidades pudieron ser cuantificadas por la mayor resistencia de las probetas que incorporaban escorias con respecto a las fabricadas con áridos silíceos usuales.

Son por lo tanto este tipo de mezclas bituminosas ejemplo de la calidad que puede obtenerse con subproductos industriales sin perjudicar al material final, sino incluso mejorando las propiedades obtenidas. A su vez, este tipo de mezclas representan soluciones para casos en concreto que se dan en diversidad de carreteras y que suponen técnicas habituales, ambientalmente más amigable y sostenibles. Estas características ambientales se consiguen por el empleo de subproductos industriales en elevados porcentajes, la no extracción de materias primas, la no deposición de materiales en vertedero y, por supuesto, la utilización de técnicas de producción con emulsión bituminosa a temperatura ambiente mucho más sostenibles.

Abstract

The construction sector is one of the most demanding sectors in terms of raw materials that exists today, more specifically, road construction is an activity which involves a significant consumption of virgin materials and a high emission of greenhouse gases by production processes. Nevertheless, road building is an essential activity which brings various economic and social benefits to the population. Therefore, new materials which satisfy infrastructure needs but do not have a high environmental report should be promoted.

This tendency is framed into the new circular economy and is motivated by a greater environmental awareness of the population and more stringent environmental regulations. Based on the above, and with the idea of creating sustainable materials for the conservation and maintenance of roads, in this thesis proposes the use of two industrial by-products which are produced in large quantities, electric arc furnace slag and ladle furnace slag. Both by-products derive from the steelmaking industry from the production of steel from scrap and have very particular characteristics that are interesting for their application in bituminous mixtures.

With the aim of developing bituminous mixtures dedicated to road maintenance and which incorporate both by-products, this thesis carried out a clear and objective methodology in which the strengths of the materials are identified, as well as possible weaknesses points.

To this end, first the electric arc furnace and ladle furnace slags are characterised to determine their physical properties and chemical composition. In this way, the strengths of the materials and their possible weaknesses could be determined in order to incorporate them into new bituminous mixtures.

With this initial hypothesis, proceeded to execute three types of bituminous mixtures in which the incorporation of the waste would produce benefits to the final characteristics of the material.

Firstly, proceeded to carry out a study of the Incorporation of Ladle Furnace Slag in the Manufacture of Cold In-Place Recycling with Bitumen Emulsion. In this type of

low environmental impact mix, ladle furnace slag is used as a filler aggregate in order to obtain higher than expected strength. This resistant property was achieved thanks to the chemical composition of the detailed slag, since as has been referenced in various investigations, it has cementitious properties.

In addition, and with the aim to take full advantage of the strength characteristics and textural of the electric arc furnace slag, porous asphalts with bitumen emulsion, electric arc furnace slag and cellulose fibres were executed. These mixtures with discontinuous grading obtain their compressive strength from the mineral skeleton provided by the electric arc furnace slag, as well as their tensile strength by the mastic conformed to the small-sized slag, the bitumen emulsion and the cellulose fibers.

At the same time, and given the polishing resistance of the electric arc furnace slag, a surface treatment was developed with the mentioned slags and bituminous emulsion for pavements that had lost their friction characteristics by the time. The use of the electric arc furnace slag as a coarse aggregate promoted an adherent layer with a treatment that was quick and economical to apply.

Finally, SMA (Stone Mastic Asphalt) type bituminous mixtures for high traffic roads were executed with electric arc furnace slag as fine and coarse aggregate, ladle furnace slag as filler and cellulose fibers. This type of high quality mixture is the most important proof of the detailed slags, as high quality materials are used for forming and consequently the goodness of the slags is quantified in depth.

The tests of the different bituminous mixtures, characteristic of each mix and according to the function that it performs, reflected clear and objective results that have been published in international journals. On the one hand, Cold In-Place Recycling with Bitumen Emulsion achieved a resistance higher than that set by the regulations thanks to the incorporation of 10% of ladle furnace slag. The porous asphalt with bitumen emulsion and electric arc furnace slag obtained a high percentage of voids and excellent resistance to fragmentation. These properties were achieved by the significant increase in bitumen in the mixes due to the incorporation of discarded fibres from the papermaking industry and the absorption of the electric arc furnace slag. However, there were no problems with plastic deformations as determined by the Marshall test. In turn,

the surface treatment with electric arc furnace slag showed acceptable values of cohesion and adhesion with the inferior layer, as well as a low loss of particles due to traffic abrasion. Finally, the SMA (Stone Mastic Asphalt) mixtures with electric arc furnace slag and ladle furnace slag showed excellent performance of the electric arc furnace slag as an aggregate as well as the cementitious properties of the ladle furnace slag. These qualities could be quantified by the higher strength of the samples incorporating slag compared to those made from conventional siliceous aggregates.

Are therefore, these types of mixtures are therefore an example of the quality that can be obtained with industrial by-products without damaging the final material, but even improving the properties obtained. At the same time, this type of mixes represents solutions for specific cases which occur in a variety of roads and which involve common, more environmentally friendly and sustainable techniques. These environmental characteristics are achieved by the use of industrial by-products in high percentages, the non-extraction of raw materials, the non-deposition of materials in landfills and, of course, the use of production techniques with bitumen emulsion at ambient temperature much more sustainable.

Índice de contenidos

Agradecimientos.....	iv
Resumen.....	v
Abstract	viii
Índice de contenidos.....	xi
Índice de tablas.....	xix
Índice de figuras.....	xxii
Índice de fórmulas	xxv
1. Introduction.....	1
2. Objetivos.....	5
3. Estado del arte.....	9
3.1. Residuos. Generalidades, conceptos y origen de los residuos	9
3.1.1. <i>El Medio ambiente.....</i>	9
3.1.2. <i>Los vectores de contaminación</i>	10
3.1.3. <i>Definición de residuo.....</i>	14
3.1.4. <i>La generación de residuos.....</i>	15
3.1.4.1. <i>Problemática Medioambiental de la Unión Europea</i>	16
3.1.4.2. <i>Noción de ecología industrial.....</i>	16
3.1.2. <i>Clasificación, gestión de los residuos y bolsa de subproductos.....</i>	17
3.1.2.1. <i>Política de tratamiento de residuos</i>	17
3.1.2.2. <i>Evolución en la gestión de residuos</i>	19
3.1.2.3. <i>Las mejores tecnologías disponibles.....</i>	20
3.1.2.4. <i>Reciclaje.....</i>	20
3.1.2.5. <i>Clasificación de los residuos.....</i>	21
3.1.2.6. <i>Los residuos tóxicos y peligrosos.....</i>	22

3.1.2.7. Las prioridades en la gestión de residuos.....	22
3.1.2.8. Vertido y ciclo de vida.....	23
3.1.2.9. Valorización de los residuos procedentes de la industria siderúrgica y metalúrgica.....	24
3.1.2.9.1. Cementos de escorias.....	24
3.1.2.9.2. Hormigones de escorias.....	25
3.1.2.9.3. Cemento fabricado a partir de escorias:.....	25
3.1.2.9.4. Escorias como sustituto de la grava.....	26
3.1.2.9.5. Reciclado por fusión de escorias de hornos eléctricos.....	26
3.2. Produccion de escorias de horno de arco eléctrico y escorias de horno cuchara.....	27
3.2.1. Origen.....	27
3.2.2. Volumen y distribución.....	27
3.2.3. Valorización.....	28
3.2.3.1. Propiedades.....	28
3.2.3.2. Procesamiento.....	29
3.2.3.3. Propiedades del material procesado.....	29
3.2.3.3.1. Escorias Negras.....	29
3.2.3.3.2. Escorias Blancas.....	30
3.2.3.4. Aplicaciones.....	30
3.2.3.5. Obras realizadas.....	31
3.2.4. Consideraciones Ambientales.....	32
3.2.5. Aspectos económicos.....	32
3.3. Investigaciones recientes sobre escorias de horno eléctrico y escorias de horno cuchara.....	33

3.4. Mezclas bituminosas para conservación de carreteras.....	35
3.4.1. Firmes reciclados in situ con emulsión bituminosa	37
3.4.2. Asfalto poroso con emulsión bituminosa.....	40
3.4.3. Tratamientos superficiales para el aumento de la adherencia	41
3.4.4. Mezclas tipo SMA (Stone Mastic Asphalt)	42
4. Materiales y metodología	45
4.1. Materiales	45
4.1.1. Escorias de horno de arco eléctrico	46
4.1.2. Escorias de horno cuchara	47
4.1.3. Firme reciclado	47
4.1.4. Arena silícea	48
4.1.5. Fibras de celulosa de la industria papelera	48
4.1.6. Árido coreano	49
4.1.7. Filler calizo	49
4.1.8. Emulsión bituminosa C60B5 REC	50
4.1.9. Emulsión bituminosa C60B4 MIC	51
4.1.10. Emulsión bituminosa C60BF3 MBA.....	52
4.1.11. Betún 50/70.....	53
4.2. Metodología	54
4.2.1. Caracterización de las materias primas.....	55
4.2.1.1. Caracterización de las escorias de horno de arco eléctrico y las escorias de horno cuchara	55
4.2.1.2. Caracterización del firme reciclado	57
4.2.1.3. Caracterización de las fibras de celulosa.....	58

4.2.2. Conformado de las diferentes mezclas bituminosas con escorias de horno de arco eléctrico y escorias de horno cuchara.....	58
4.2.2.1. Firmes reciclado in situ con emulsion bituminosa y escorias de horno cuchara.....	59
4.2.2.1.1. Determinación de la curva granulométrica con la combinación de escorias de horno cuchara y firme reciclado. Determinación de la granulometría de las partículas (UNE-EN 933-1:2012).....	61
4.2.2.1.2. Ensayo Proctor Modificado (UNE 103501:1994).....	62
4.2.2.1.3. Envuelta y resistencia al desplazamiento por agua de las emulsiones bituminosas (NLT-196/84).....	63
4.2.2.1.4. Conformado de las diferentes familias de mezclas bituminosas. Resistencia a compresión simple de mezclas bituminosas (NLT-161/98).....	64
4.2.2.1.5. Determinación de la densidad máxima (UNE-EN 12697-5:2020).....	66
4.2.2.1.6. Determinación de la densidad aparente (UNE-EN 12697-6:2012).....	67
4.2.2.1.7. Determinación del contenido de huecos (UNE-EN 12697-8:2020)....	67
4.2.2.1.8. Ensayo de Inmersión – Compresión (NLT-162/00).....	68
4.2.2.1.9. Fórmula óptima de trabajo.....	69
4.2.2.2. Asfalto poroso con emulsión bituminosa, escorias de horno de arco eléctrico y fibras de celulosa desechadas de la industria papelera.....	70
4.2.2.2.1. Determinación de la adhesividad de las emulsiones bituminosas por inmersión en agua (UNE-EN 13614).....	75
4.2.2.2.2. Preparación de probetas mediante compactador de impactos (UNE-EN 12697-30:2019).....	77
4.2.2.2.3. Determinación de la densidad máxima (UNE-EN 12697-5:2020).....	79
4.2.2.2.4. Determinación de la densidad aparente (UNE-EN 12697-6:2012).....	79
4.2.2.2.5. Determinación del contenido de huecos (UNE-EN 12697-8:2020)....	80

4.2.2.2.6. Pérdida de partículas de probetas de mezclas bituminosas drenantes (UNE-EN 12697-17:2018).....	80
4.2.2.2.7. Efecto del agua sobre la cohesión de mezclas bituminosas de granulometría abierta (NLT-362/92).....	82
4.2.2.2.8. Ensayo Marshall (UNE-EN 12697-34:2013).....	83
4.2.2.2.9. Fórmula óptima de trabajo.....	85
4.2.2.3. Tratamiento superficial para recuperación de adherencia con escorias de horno de arco eléctrico.....	85
4.2.2.3.1. Determinación de la curva granulométrica con la combinación de escorias de horno de arco eléctrico y arena silíceas. Determinación de la granulometría de las partículas (UNE-EN 933-1:2012).....	89
4.2.2.3.2. Determinación de la envuelta y la resistencia al desplazamiento por el agua de las emulsiones bituminosas (NLT-196/84).....	90
4.2.2.3.3. Determinación del contenido mínimo de ligante y resistencia al desgaste (UNE-EN 12274-5:2020).....	91
4.2.2.3.4. Determinación del porcentaje de aditivo para el control de la rotura de la emulsión. Ensayo de envuelta (NLT-196/84).....	93
4.2.2.3.5. Determinación de la cohesión de la mezcla (UNE-EN 12274-4:2020).....	94
4.2.2.4. Mezclas bituminosas SMA (Stone Mastic Asphalt) con escorias de horno de arco eléctrico y escorias de horno cuchara	95
4.2.2.4.1. Determinación de la densidad máxima (UNE-EN 12697-5:2020).....	98
4.2.2.4.2. Determinación de la densidad aparente (UNE-EN 12697-6:2012).....	99
4.2.2.4.3. Determinación del contenido de huecos (UNE-EN 12697-8:2020)	99
4.2.2.4.4. Ensayo Marshall (UNE-EN 12697-34:2013).....	100
4.2.2.4.5. Ensayo de escurrimiento de ligante (UNE-EN 12697-18:2018).....	101
4.2.2.4.6. Ensayo de rodadura (UNE-EN 12697-22:2008+A1:2008).....	102
5. Resultados y discusión.....	104

5.1. Caracterización de las materias primas	104
5.1.1. <i>Caracterización de las escorias de horno de arco eléctrico y las escorias de horno cuchara</i>	<i>104</i>
5.1.2. <i>Caracterización del firme reciclado</i>	<i>111</i>
5.2. Conformado de las diferentes mezclas bituminosas con escorias de horno de arco eléctrico y escorias de horno cuchara.	114
5.2.1. <i>Firmes reciclado in situ con emulsión bituminosa y escorias de horno cuchara</i>	<i>115</i>
5.2.1.1. <i>Determinación de la curva granulométrica con la combinación de escorias de horno cuchara y firme reciclado. Determinación de la granulometría de las partículas (UNE-EN 933-1:2012)</i>	<i>115</i>
5.2.1.2. <i>Ensayo Proctor Modificado (UNE 103501:1994)</i>	<i>118</i>
5.2.1.3. <i>Envuelta y resistencia al desplazamiento por agua de las emulsiones bituminosas (NLT-196/84).....</i>	<i>119</i>
5.2.1.4. <i>Conformado de las diferentes familias de mezclas bituminosas. Resistencia a compresión simple de mezclas bituminosas (NLT-161/98)</i>	<i>120</i>
5.2.1.5. <i>Determinación de la densidad máxima (UNE-EN 12697-5:2020).....</i>	<i>121</i>
5.2.1.6. <i>Determinación de la densidad aparente (UNE-EN 12697-6:2012).....</i>	<i>122</i>
5.2.1.7. <i>Determinación del contenido de huecos (UNE-EN 12697-8:2020)</i>	<i>123</i>
5.2.1.8. <i>Ensayo de Inmersión – Compresión (NLT-162/00)</i>	<i>124</i>
5.2.1.9. <i>Fórmula óptima de trabajo.....</i>	<i>125</i>
5.2.2. <i>Asfalto poroso con emulsión bituminosa, escorias de horno de arco eléctrico y fibras de celulosa desechadas de la industria papelera.....</i>	<i>128</i>
5.2.2.1. <i>Determinación de la adhesividad de las emulsiones bituminosas por inmersión en agua (UNE-EN 13614).....</i>	<i>128</i>
5.2.2.2. <i>Preparación de probetas mediante compactador de impactos (UNE-EN 12697-30:2019)</i>	<i>130</i>
5.2.2.3. <i>Determinación de la densidad máxima (UNE-EN 12697-5:2020).....</i>	<i>132</i>

5.2.2.4. Determinación de la densidad aparente (UNE-EN 12697-6:2012).....	133
5.2.2.5. Determinación del contenido de huecos (UNE-EN 12697-8:2020)	134
5.2.2.6. Pérdida de partículas de probetas de mezclas bituminosas drenantes (UNE-EN 12697-17:2018) y efecto del agua sobre la cohesión de mezclas bituminosas de granulometría abierta (NLT-362/92).....	135
5.2.2.7. Ensayo Marshall (UNE-EN 12697-34:2013)	137
5.2.2.8. Fórmula óptima de trabajo.....	138
<i>5.2.3. Tratamiento superficial para recuperación de adherencia con escorias de horno de arco eléctrico.....</i>	<i>141</i>
5.2.3.1. Determinación del a curva granulométrica con la combinación de escorias de horno de arco eléctrico y arena silíceo. Determinación de la granulometría de las partículas (UNE-EN 933-1:2012).....	141
5.2.3.2. Determinación de la envuelta y la resistencia al desplazamiento por el agua de las emulsiones bituminosas (NLT-196/84).....	145
5.2.3.3. Determinación del contenido mínimo de ligante y resistencia al desgaste (UNE-EN 12274-5:2020).....	146
5.2.3.4. Determinación del porcentaje de aditivo para el control de la rotura de la emulsión. Ensayo de envuelta (NLT-196/84).....	147
5.2.3.5. Determinación de la cohesión de la mezcla (UNE-EN 12274-4:2020)....	148
5.2.3.6. Combinación óptima de los materiales	149
<i>5.2.4. Mezclas bituminosas SMA (Stone Mastic Asphalt) con escorias de horno de arco eléctrico y escorias de horno cuchara.....</i>	<i>151</i>
5.2.4.1. Determinación de la densidad aparente (UNE-EN 12697-6:2012).....	151
5.2.4.2. Determinación de la densidad máxima (UNE-EN 12697-5:2020).....	152
5.2.4.3. Determinación del contenido de huecos (UNE-EN 12697-8:2020)	153
5.2.4.4. Ensayo Marshall (UNE-EN 12697-34:2013)	154

5.2.4.5. Determinación de las fórmulas óptimas de trabajo y comparación de los resultados	156
6. Conclusions	159
7. Líneas futuras de investigación	163
8. Bibliografía.....	164
9. Artículos publicados.....	174

Índice de tablas

Tabla 4.1. Ficha técnica de la emulsión bituminosa C60B5 REC.	51
Tabla 4.2. Ficha técnica de la Emulsión Bituminosa C60B4 MIC.....	52
Tabla 4.3. Ficha técnica de la emulsión bituminosa C60BF3 MBA.....	53
Tabla 4.4. Ficha técnica del betún 50/70.	54
Tabla 4.5. Curva granulométrica de las escorias negras referidas al huso granulométrico establecido por la normativa.	72
Tabla 4.6. Porcentajes de betún, emulsión bituminosa y agua de las diferentes familias de probetas conformadas.	88
Tabla 4.7. Familias de mezclas bituminosas conformadas con escorias de horno de arco eléctrico, árido corneano, escorias de horno cuchara, filler calizo y fibras de la industria papelera.	96
Tabla 5.1. Análisis elemental de las escorias de horno cuchara.....	104
Tabla 5.2. Ensayo de fluorescencia de Rayos X de las escorias de horno cuchara.	105
Tabla 5.3. Densidad y plasticidad de las escorias de horno cuchara.	106
Tabla 5.4. Análisis elemental de las escorias de horno de arco eléctrico.....	107
Tabla 5.5. Ensayo de fluorescencia de Rayos X de las escorias de horno de arco eléctrico.	107
Tabla 5.6. Propiedades físicas de las escorias de horno de arco eléctrico.	108
Tabla 5.7. Concentración de los elementos químicos analizados en el lixiviado de las escorias de horno de arco eléctrico (EAFS) y en las escorias de horno cuchara (LFS) según la norma UNE-EN 12457-3.....	110
Tabla 5.8. Características del ligante recuperado del firme fresado.	111
Tabla 5.9. Ensayos del árido grueso y el árido fino del firme fresado.....	112
Tabla 5.10. Análisis elemental de las fibras de celulosa desechadas por la industria papelera.	113

Tabla 5.11. Curva granulométrica del firme fresado referenciado al huso granulométrico RE2 de la Orden Circular 8/2001.	116
Tabla 5.12. Curva granulométrica de las escorias blancas referenciadas al huso granulométrico RE2 de la Orden Circular 8/2001.....	117
Tabla 5.13. Curva granulométrica combinación firme fresado 90% y escorias blancas 10% referenciadas al huso granulométrico RE2 de la Orden Circular 8/2001.....	118
Tabla 5.14. Ensayos Proctor Modificado UNE 103501 para el 90% del firme fresado y el 10% de escorias blancas y diferentes porcentajes de humedad.....	119
Tabla 5.15. Grupo de probetas fabricadas con diferentes porcentajes de emulsión y agua de preenvuelta sobre árido.	121
Tabla 5.16. Densidad máxima de las diferentes familias de probetas conformadas con firme reciclado, escorias de horno cuchara y diferentes porcentajes de emulsión bituminosa.....	122
Tabla 5.17. Densidad aparente de las diferentes familias de probetas conformadas con firme reciclado, escorias de horno cuchara y diferentes porcentajes de emulsión bituminosa.....	122
Tabla 5.18. Índice de huecos de las diferentes familias de probetas conformadas con firme reciclado, escorias de horno cuchara y diferentes porcentajes de emulsión bituminosa.	123
Tabla 5.19. Resistencia a compresión simple con y sin inmersión de las diferentes familias de probetas conformadas con firme reciclado, escorias de horno cuchara y diferentes porcentajes de emulsión bituminosa.	125
Tabla 5.20. Combinación óptima de materiales para la realización de firmes reciclados in situ con emulsión bituminosa y resultados de los ensayos.....	127
Tabla 5.21. Ensayo de adhesión de las escorias negras y la emulsión bituminosa C67BF3 MBA.	129
Tabla 5.22. Composición de la curva granulométrica de escorias negras para la fabricación de una probeta del tipo Marshall.	130

Tabla 5.23. Porcentajes de emulsión y betún para los grupos de probetas conformados de mezclas bituminosas con escorias negras y fibras.....	131
Tabla 5.24. Densidad máxima de los grupos de muestras con escorias negras, emulsión bituminosa y fibras de celulosa.	133
Tabla 5.25. Densidad aparente de los grupos de muestras con escorias negras, emulsión bituminosa y fibras de celulosa.	134
Tabla 5.26. Densidad aparente de los grupos de muestras con escorias negras, emulsión bituminosa y fibras de celulosa.	135
Tabla 5.27. Ensayo de pérdida de partículas con y sin inmersión de las probetas para todas las familias de mezclas bituminosas.	136
Tabla 5.28. Ensayo Marshall para todos los grupos de muestras con escorias negras y fibras de celulosa.	138
Tabla 5.29. Resultados de todos los ensayos para la combinación óptima de materiales.	139
Tabla 5.30. Resultados de los ensayos del tratamiento superficial con escorias de horno de arco eléctrico y la combinación óptima de materiales.	150
Tabla 5.31. Resultados de los ensayos para la combinación optima de materiales de las diferentes familias de mezclas bituminosas ACFC, ASFC y ASFS.	157

Índice de figuras

Figura 4.1. Gráfico de la curva granulométrica de las escorias negras referidas al huso granulométrico establecido por la normativa.	72
Figura 4.2. Curva granulométrica de las diferentes familias de mezclas bituminosas (ACFC, ASFC y ASFC) tipo SMA.	97
Figura 5.1. Imagen de las fibras de celulosa de la Industria Papelera obtenida con el Microscopio Electrónico de Barrido en la opción secundarios.....	114
Figura 5.2. Curva granulométrica del firme fresado referenciado al huso granulométrico RE2 de la Orden Circular 8/2001.	115
Figura 5.3. Curva granulométrica de las escorias blancas referenciadas al huso granulométrico RE2 de la Orden Circular 8/2001.....	116
Figura 5.4. Curva granulométrica combinación firme fresado 90% y escorias blancas 10% referenciadas al huso granulométrico RE2 de la Orden Circular 8/2001.....	118
Figura 5.5. Ensayos Proctor Modificado UNE 103501 para el 90% del firme fresado y el 10% de escorias blancas.....	119
Figura 5.6. Ensayo de Envuelta NLT-196/84 para firme fresado, escorias blancas y 3% de emulsión con diferentes porcentajes de agua de preenvuelta. (a) 0,9% de agua sobre árido, (b) 1,9% de agua sobre árido y (c) 2,9% de agua sobre árido.....	120
Figura 5.7. Gráfico de la densidad máxima de las diferentes familias de probetas conformadas con firme reciclado, escorias de horno cuchara y diferentes porcentajes de emulsión bituminosa.	121
Figura 5.8. Gráfico de la densidad aparente de las diferentes familias de probetas conformadas con firme reciclado, escorias de horno cuchara y diferentes porcentajes de emulsión bituminosa.	122
Figura 5.9. Gráfico del índice de huecos de las diferentes familias de probetas conformadas con firme reciclado, escorias de horno cuchara y diferentes porcentajes de emulsión bituminosa.	123

Figura 5.10. Gráfico de resistencia a compresión simple con y sin inmersión de las diferentes familias de probetas conformadas con firme reciclado, escorias de horno cuchara y diferentes porcentajes de emulsión bituminosa.....	124
Figura 5.11. Calculo de la fórmula óptima de trabajo en función del ensayo de resistencia a compresión simple en seco NLT-162/00 para los diferentes porcentajes de emulsión de cada familia de probetas.....	126
Figura 5.12. Ensayo de adhesión de las escorias negras y la emulsión bituminosa C67BF3 MBA. Adhesividad inmediata emulsión - escorias negras (Izquierda). Adhesión escorias negras - betún (Derecha).	129
Figura 5.13. Gráfico de la densidad máxima de los grupos de muestras con escorias negras, emulsión bituminosa y fibras de celulosa.	132
Figura 5.14. Gráfico de la densidad aparente de los grupos de muestras con escorias negras, emulsión bituminosa y fibras de celulosa.	133
Figura 5.15. Gráfico de la densidad aparente de los grupos de muestras con escorias negras, emulsión bituminosa y fibras de celulosa.	134
Figura 5.16. Grafico ensayo de pérdida de partículas con y sin inmersión de las probetas para todas las familias de mezclas bituminosas.	136
Figura 5.17. Gráfico del ensayo Marshall para todas las familias de probetas con escorias negras y fibras de celulosa. (a) Estabilidad Marshall y (b) deformación Marshall.	138
Figura 5.18. Curva granulométrica de las escorias de horno de arco eléctrico.	142
Figura 5.19. Curva granulométrica de las escorias de horno de arco eléctrico tamizadas por el tamiz 8 mm.....	143
Figura 5.20. Curva granulométrica de la arena silícea.	143
Figura 5.21. Curva granulométrica obtenida por la combinación del 33% de escorias de horno de arco eléctrico y el 66% de la arena silícea.	144
Figura 5.22. Ensayo de envuelta con el agua de preenvuelta y la emulsión bituminosa C60B4 MIC. (a) Ensayo de envuelta. (b) Ensayo de envuelta tras lavado en agua.	145

Figura 5.23. Determinación de la resistencia al desgaste de las diferentes familias de mezclas bituminosas según el porcentaje de betún (standard UNE-EN 12274-5).	146
Figura 5.24. Porcentaje de aditivo necesario en cada familia para la obtención de un tiempo de rotura de 35 segundos de la emulsión.	147
Figura 5.25. Determinación de la cohesión de las diferentes familias de mezclas bituminosas según el porcentaje de betún (standard UNE-EN 12274-4).	148
Figura 5.26. Densidad aparente de las mezclas bituminosas conformadas con escorias de horno de arco eléctrico, árido corneano, escorias de horno cuchara, filler calizo y fibras de celulosa, con diferentes porcentajes de betún en volumen y sobre árido.	151
Figura 5.27. Densidad máxima de las mezclas bituminosas conformadas con escorias de horno de arco eléctrico, árido corneano, escorias de horno cuchara, filler calizo y fibras de celulosa, con diferentes porcentajes de betún en volumen y sobre árido.	152
Figura 5.28. Índice de huecos de las mezclas bituminosas conformadas con escorias de horno de arco eléctrico, árido corneano, escorias de horno cuchara, filler calizo y fibras de celulosa, con diferentes porcentajes de betún en volumen y sobre árido.	153
Figura 5.29. Estabilidad Marshall de las mezclas bituminosas conformadas con escorias de horno de arco eléctrico, árido corneano, escorias de horno cuchara, filler calizo y fibras de celulosa, con diferentes porcentajes de betún en volumen y sobre árido.	154
Figura 5.30. Deformación Marshall de las mezclas bituminosas conformadas con escorias de horno de arco eléctrico, árido corneano, escorias de horno cuchara, filler calizo y fibras de celulosa, con diferentes porcentajes de betún en volumen y sobre árido.	156

Índice de fórmulas

Fórmula 4.1. Fórmula Densidad máxima.	66
Fórmula 4.2. Fórmula Densidad aparente.	67
Fórmula 4.3. Fórmula contenido en hueco.	68
Fórmula 4.4. Fórmula resistencia conservada.	69
Fórmula 4.5. Fórmula para determinar la proporción de betún residual	73
Fórmula 4.6. Fórmula Densidad aparente.	80
Fórmula 4.7. Fórmulas para determinar el valor de la pérdida de partículas.....	81
Fórmula 4.8. Fórmula para determinar el índice de aumento de pérdidas de partículas.	83
Fórmula 4.9. Fórmula para determinar la pérdida de masa.	92
Fórmula 4.10. Fórmula para determinar el material escurrido.....	102
Fórmula 4.11. Fórmula para determinar el porcentaje de la profundidad de rodera...	103

1. Introduction

Road construction is an essential activity for the economic development of a nation and the enhancement of social welfare. Moreover road transport accounts for a high percentage of total goods transport being essential on short and medium distance communication. Therefore, the construction of higher quality and safer roads for vehicles is an undoubted fact [1,2]. However, this type of infrastructure supposes an affection the environment all throughout its life cycle [3].

The environmental impact produced by road construction begins at the moment of laying out, altering the landscape. Subsequently, for construction a series of materials are necessary in significant quantities which are mainly extracted from nearby quarries. At the same time, during the manufacture of the bituminous mixtures, CO₂ emissions are emitted and fossil fuels are consumed. Transport equipments, extension of the bituminous mix and compaction also represent a source of greenhouse gas emissions. Once the infrastructure has been executed, conservation and maintenance work [4], as well as the continuous flow of vehicles, have a significant impact on the environment during their working life [5]. At the end of their working life, the aged materials are removed and dumped in landfills in the majority of cases, without taking advantage of the usefulness they still suppose[6].

According to the scheme detailed above, corresponding to the so-called Linear Economy, significant greenhouse gas emissions are produced through all the life cycle of the road. Therefore, and in accordance with the new Circular Economy [7], these emissions must be reduced with different methods [8]. Among these different ways of reducing environmental impact is the use of industrial by-products as raw materials [9]. In this way, the extraction of natural materials is reduced, with the consequent reduction in gas emissions, and the dumping of industrial waste is avoided [10]. On the other hand, the use of more environmentally sustainable manufacturing techniques for bituminous mixtures, with much more optimised processes, also means a significant reduction in environmental impact.

In other words, the development of sustainable materials with industrial by-products, with a longer working life and higher quality, implies a significant reduction

in greenhouse gas emissions [11,12]. In turn, the use of aged materials for the manufacture of new materials avoids their deposition in landfills and reduces the extraction of new raw materials. In this way, the environmental impact is significantly reduced and the flow of materials is closed [13]. It should be emphasised that the good condition of the pavement, as has been shown in various publications, has a significant influence on fuel consumption and, consequently, on CO₂ emissions and accidents [14–16]. Therefore, far from trying to avoid the construction of new roads or maintenance, it is necessary to provide a quality infrastructure, which allows comfortable and safe use, and at the same time, is as sustainable as possible [17,18].

In line with the above, different research projects have emerged in which waste has been incorporated into the manufacture of bituminous mixtures as a substitute for traditional aggregates. Among these wastes are recycled concrete waste [19], copper slag [20], ceramic and brick dust [21], polymer waste [22], recycled glass [23], reclaimed asphalt pavement [24] and recycled crumb rubber [25], among others.

The use of waste is therefore a good option aimed into the Circular Economy that tries to obtain final products of similar or even higher quality. For this reason, this thesis presents different types of bituminous mixtures which are common in road maintenance and in which the properties of industrial by-products are optimised. These industrial by-products are electric arc furnace slag and ladle furnace slag.

Electric arc furnace slag and ladle furnace slag are by-products of the process of obtaining steel from scrap or wrought iron. In the first stage of melting carried out in an electric arc furnace, oxidation removes manganese and silicon, achieving dephosphorisation and creating a foamed slag in which all the impurities are accumulated. This slag is called electric arc furnace slag (EAFS) or black slag. The next refining stage is carried out for the reduction of metal oxides, desulphurisation and decarbonisation of the steel [26]. The main objective of the refining stage is to obtain steel with a low oxygen and sulfur content, so the refining furnace or ladle furnace is fed with molten liquid from the previous stage. Subsequently, it is covered with a reduction slag that is made up of lime, fluorspar, coke and graphite in suitable quantities. Deoxidation is achieved by the simple contact of the molten liquid with the slag. However, complete

deoxidation occurs through the addition of silicon and manganese ferroalloys, which leads to liquid particles retained in the slag that are formed in the metal bath. Desulphurisation minimises the amount of sulfur in the steel due to the presence of calcium and carbon oxide. This process produces the ladle furnace slag (LFS) used, in a portion of 20 to 30 kg per final ton of steel. Electric arc furnace slag (EAFS) is produced in larger quantities, assuming a quantity of approximately 150 kg per final ton of steel.

Slag from electric arc furnaces, with remarkable strength, angularity and hardness characteristics, can become the ideal substitute for virgin aggregate for the diversity of road infrastructure materials (mainly in asphalt mixtures). However, their use is reduced to the materials in which no optimisation of their qualities is made, such that it can be fillers, agricultural roads and other low-category constructions. Therefore, the use of these slags should be studied in materials that make the most of their properties for the execution of new bituminous mixtures that are more sustainable for the environment, as is the case with this thesis. On the other hand, ladle furnace slag has not generally been used in the creation of new materials [27–30]. However, ladle furnace slag has a fine classification that makes it suitable for various purposes [31,32], among them, the incorporation of ladle furnace slag in the manufacture of cold in-place recycling with bitumen emulsion, one of the bituminous mixtures in this thesis. This slag can produce very interesting cementitious characteristics for this type of mixture, since cold manufacturing and mixing with water and emulsion promotes the development of these qualities.

Both ladle furnace slag and electric furnace slag have a different chemical composition and physical properties, so each material must be used in the bituminous mixtures conformed with different function. Electric arc furnace slag by its resistance, shape and particle size was used as both coarse and fine aggregate in this investigation. Ladle furnace slags, due to their small particle size and chemical composition, were applied as fine material or filler.

To test the effectiveness of both wastes, four different types of bituminous mixtures have been created and are usually used in road maintenance. On the one hand, have been conformed cold in-place recycling with bitumen emulsion and ladle furnace

slag. On the other hand, mixtures of porous asphalt with cellulose fibers, electric arc furnace slag and bitumen emulsion have been produced. Also, surface treatments with electric arc furnace slag were elaborated. And finally, SMA (Stone Mastic Asphalt) type bituminous mixtures have been developed with electric arc furnace slags and ladle furnace slags.

In order to corroborate the properties of electric arc furnace slag and ladle furnace slag for use in bituminous mixtures, firstly it was analyzed the chemical composition and physical properties of the slag. The different bituminous mixtures were then produced and finally the physical and mechanical properties obtained from the mixtures were compared with the limits set by the regulations. In this way the suitability and goodness of the incorporation of electric arc furnace slag and ladle furnace slag into bituminous mixtures can be objectively evaluated.

These four types of mixtures are presented in the following chapters, and the data corresponding in the publications that have been obtained by the partial publication of the results of this thesis, that is, for each type of mixture, are reported. A series of discussions of each chapter or article is shown at the end of this document, as well as final conclusions derived directly from all the research carried out and relating to the use of electric arc furnace slag and ladle furnace slag in the manufacture of bituminous mixtures.

2. Objetivos

La conservación de carreteras, como se ha detallado con anterioridad, es una de las partidas principales en la que se debe invertir para mantener los nexos de comunicación, transporte y desarrollo del país. Es imprescindible contar con una red de vías terrestres acordes al crecimiento de la economía y con los parámetros de seguridad adecuados para el transporte tanto de mercancías, como de personas. De esta idea fundamental, de la crisis económica por la que está atravesando España y de las legislaciones ambientales más restrictivas sobre residuos, nace la idea de la utilización de escorias de acería de horno de arco eléctrico y escorias de horno cuchara como material principal de los tratamientos, reciclados y mezclas bituminosas ejecutadas para la conservación de carreteras.

Las escorias de acería poseen una composición y características particulares que las hacen idóneas para su empleo en tal fin, siendo sus propiedades comparables con los áridos de mejor calidad, como pudo comprobarse en los estudios preliminares realizados por el Grupo de Investigación TEP 222. Es por lo tanto este concepto sobre el que se fundamenta la presente tesis, el estudio de la resistencia y características mecánicas de diversas mezclas bituminosas conformadas con escorias de acería, así como su comparación con las que habitualmente se están desarrollando. El objetivo final que se persigue es el desarrollo de una serie de tratamientos, mezclas bituminosas y reciclados de firmes con la utilización de escorias, que sean capaces de proporcionar unas características similares a las realizadas en la actualidad y que supongan un ahorro económico, así como una visión medioambiental mucho más agradable y compenetrada con el marco europeo de reutilización de residuos.

A continuación, se procede a detallar los objetivos derivados del fin principal de la tesis:

- Caracterización físico – química de las propiedades y características de las escorias de horno de arco eléctrico y de horno cuchara, así como su idoneidad para su empleo en actuaciones destinadas a la conservación de viales según la normativa vigente.

- Estudio de los diversos problemas presentables en las infraestructuras lineales de transporte para la elección del método que mejores aptitudes desarrolle a los firmes deteriorados.
- Estudio de los diferentes tratamientos, mezclas bituminosas y reciclados de pavimentos, así como su posible conformación con escorias de acería de horno eléctrico.
- Comparación de las propiedades obtenidas de las actuaciones realizadas con escorias y las limitaciones de la normativa española vigente.
- Desarrollo y convergencia de resultados hacia el fin primordial de Ingeniería sostenible y circular, en la cual, los residuos extraídos de cualquier actividad son materias primas para actividades posteriores.
- Aumento de la competitividad de las empresas utilizadoras de este tipo de material en las actuaciones detalladas respecto al mercado nacional e internacional.

Una vez descrita abreviadamente los objetivos integrados en la presente tesis se presentan a continuación los objetivos clasificados que se consiguen con la finalización del presente estudio.

Objetivos Técnicos

Los objetivos técnicos responden a la necesidad de la corroboración de las propiedades obtenidas de las mezclas bituminosas, tratamientos superficiales y reciclados en frío con escorias de acería; son los siguientes.

- Estudio de la composición y propiedades físico – químicas de las escorias de acería, así como su aptitud para el empleo en labores de conservación de carreteras con los parámetros dictaminados por la legislación vigente.
- Conformación de los tratamientos, mezclas bituminosas y reciclados en frío existentes en la actualidad con escorias de acería de horno eléctrico y escorias de horno cuchara.
- Estudio de las propiedades mecánicas y físicas de las anteriores tipos de mezclas conformadas con escorias de acería.

- Obtención de la fórmula óptima de trabajo o combinación óptima de materiales para cada una de las mezclas desarrolladas, corroborando posteriormente las propiedades físicas y mecánicas para esta formulación.
- Comparación de los resultados obtenidos en los distintos casos anteriores con la normativa vigente y corroboración de la aptitud de los áridos siderúrgicos para su empleo.

Objetivos Económicos

La situación actual económica conlleva la falta de inversión en la conservación de carreteras. ASEFMA (Asociación Española de Fabricantes de Mezclas Asfálticas) asegura que para devolver a los firmes de la red estatal de carreteras de España el estado adecuado, es necesario una inversión de más de 1.500 Millones de Euros. Este hecho justifica como las operaciones de conservación de vías terrestres son demandadoras de una gran partida estatal, operaciones cuyo mayor gasto está incluido en la extracción y compra de áridos. Es por lo tanto esta tesis una respuesta a la demanda actual de soluciones que hagan posible abaratar los gastos de conservación, sin perjuicio de las calidades finales obtenidas. Solo de esta forma es posible valorizar un subproducto de la industria siderúrgica y transformarlo en una materia prima, repercutiendo beneficios a las empresas productoras de los mismos por un material que actualmente se está almacenando en vertederos y supone un coste en la producción.

Objetivos ambientales

Como se ha mencionado con anterioridad, las escorias de acería representan hoy en día un problema a solucionar, su gran porcentaje de producción entorno al 13-18% por cada tonelada de acero y su actual depósito en vertedero, no corresponden con las actitudes fijadas por las normativas europeas de residuos. La solución, dentro de una visión medioambientalmente amigable, consiste en la reutilización de las mismas evitando su depósito y posibles contaminaciones producidas por ellas. Por lo tanto, el objetivo medioambiental primordial sobre el que se asienta esta investigación es el de dar uso y poder valorizar subproductos. Evitando por otra parte, las laboriosas y contaminantes operaciones de extracción de áridos.

Objetivos estratégicos

El empleo de las escorias produce un gran ahorro en la ejecución de operaciones de conservación de carreteras, ya que como se ha comentado anteriormente la mayor parte de la inversión dedicada a estas actuaciones se consume en la compra y extracción de áridos. La disminución y abaratamiento de estas actividades hacen posible una mayor competitividad de las empresas privadas que utilicen escorias frente a los competidores nacionales. No hay que olvidar que España cuenta con las constructoras más potentes a nivel mundial, debido en gran parte al desarrollo, inversión y constante esfuerzo de las mismas por investigar nuevas líneas que hagan posible unos productos mucho menos costosos y de mejores cualidades, por lo que serían ellas las que mayor beneficio tendrían de este tipo de estudios. A nivel estatal, es obvio el coste tan enorme que conllevan las operaciones de mantenimiento, coste que se reduciría y sería posible dedicar a otras partidas necesarias.

3. Estado del arte

3.1. Residuos. Generalidades, conceptos y origen de los residuos

En este capítulo inicial se tratarán las ideas más básicas con respecto al medio ambiente y los posibles residuos que pueden verterse sin ningún control ni tratamiento, dañando por completo el ecosistema. Es importante conocer que en el tratamiento de cualquier residuo aparece una mayor cantidad de residuo sólido, ya que estos no se dispersan por vías naturales.

Debido a los grandes avances tecnológicos en los últimos años se han puesto de manifiesto nuevas estrategias de producción industrial, las cuales generan una menor cantidad de residuos favoreciendo a un menor coste de tratamiento e impacto ambiental.

Gracias a las grandes cumbres internacionales y acuerdos entre países desarrollados han aparecido nuevas corrientes como el Desarrollo Sostenible, Reducción, Reutilización, Reciclaje, Obtención de Energía, Huella de Carbono o Análisis de ciclo de vida entre otros, con el fin de evitar que los residuos pasen directamente a los vertederos de forma incontrolada.

3.1.1. El Medio ambiente

Para entender por completo el medio ambiente es necesario conocer todos los campos por los que está formado, debido a su gran complejidad e importancia. Por ello se dice que el medio ambiente es multidisciplinar, acoge según la idea tradicional tanto a los sistemas vivos (bióticos) como a los no vivos (abióticos).

Además, últimamente se han incluido en ese conjunto tanto a la sociedad (ser humano y sus comportamientos) como a la economía (micro y macro) debido al tremendo impacto que producen sobre el medio ambiente, el cual se está acentuando con el paso de los años debido al auge de las áreas industrializadas y aumento global de la población.

De esta forma queda en evidencia una cosa, según los diferentes cambios que se realicen sobre un espacio en concreto el impacto ambiental será único y exclusivo. Es por ello que se necesitaría un equipo amplio de expertos que analicen cada componente con

detenimiento (Técnico Medioambiente, Geólogo, Sociólogos, Ingenieros, Personal Sanitario Lugareños etc.).

Una vez los expertos recaban toda la información esencial la plasman en un matriz que puntúa numéricamente según una escala el impacto de una obra en ese espacio, esto se conoce como evaluación de impacto ambiental y es un paso decisivo a la hora de tomar la decisión final de si continuar con un proyecto o abortarlo.

3.1.2. Los vectores de contaminación

En el medio ambiente ocurren multitud de interacciones, ya sea con la flora, fauna, microorganismos presentes en el suelo, aguas superficiales/subterráneas, suelos, corrientes atmosféricas etc. Todas ellas capaces de dispersar de forma rápida los contaminantes provocando daños ambientales severos. Los vectores contaminantes son:

1. Aire / Ruido: Tanto la calidad del aire como los niveles de ruido son dos parámetros importantes para el bienestar humano, así pues, se trata de vigilar los niveles de partículas en suspensión, gases nocivos, nivel de decibelios...

La contaminación atmosférica se considera cuando existen sustancias de partículas o gases nocivos y perjudiciales para cualquier forma de vida o material. Los cambios que alteran la composición ideal de la atmosfera puede ser físicas, químicas y biológicas.

Debido al éxodo rural que se ha dado durante los últimos años se estima que cerca del 80% de la población en la UE vive en zonas urbanizadas, aumentando el tráfico, uso de calefacciones y acercamiento a los polígonos industriales. Se favorece a darse una situación de elevada polución afectando principalmente a los residentes, provocando multitud de enfermedades silenciosas a nivel respiratorio y cardiovascular.

Los principales contaminantes atmosféricos son los:

- Óxidos de azufre: Estos son generados prácticamente en su totalidad por el ser humano en la quema de combustibles fósiles. Son los responsables de producir la "lluvia ácida" deteriorando toda materia viva y construcciones materiales.
- Monóxido de Carbono: Se originan en las reacciones de combustión incompletas llegando a ser muy peligroso para el ser humano si se respira, produce

intoxicaciones severas e incluso la muerte (Su gran afinidad a la hemoglobina evita el transporte sanguíneo de oxígeno).

- Óxidos de Nitrógeno: Son de origen antropogénico al realizarse combustiones a elevada temperatura, se combina con el oxígeno atmosférico siendo capaz de producir enfermedades para el ser humano.
- Ozono: Es un contaminante secundario producido de forma natural por la presencia de otros contaminantes en la atmosfera. En las capas más bajas de la atmosfera si llega a ser inhalado produce fuertes irritaciones. Es de gran poder oxidativo.
- Hidrocarburos: Su origen principal es debido a las emisiones de los automóviles e industrias del petróleo. Presentan un gran problema al estar presentes en la atmósfera, llegando a ser incluso muy tóxicos como los hidrocarburos aromáticos. Causantes del Smog fotoquímico. El CO₂ es el contaminante principal en la atmósfera, proviene de diversas fuentes (Tráfico, Vertederos, Gas Natural, Electricidad...) y se busca reducir sus emisiones para evitar que se produzca el efecto invernadero.
- Partículas: Su generación y composición es muy variada debido a que pueden estar presentes en la atmósfera de forma natural (erupciones volcánicas e incendios) o artificial (antropogénico). Se diferencia fundamentalmente por tamaño de partícula, las más grandes sedimentan con facilidad, mientras que las que más pequeñas permanecen en suspensión y son más proclives a ser respiradas causando a posteriormente problemas de salud.
- Humos: Son aerosoles compuestos por partículas inferiores a una micra, siendo mayoritariamente carbono, metales etc. La combinación de contaminantes bajo un efecto determinado del clima puede provocar graves afecciones para el ser humano. Se puede distinguir entre humos blancos (temperatura insuficiente de combustión) y negros (déficit de oxígeno en la combustión).
- Metales: Proviene en principio de la incineración de residuos sólidos y aparecen en cantidades muy pequeñas, sin embargo, producen efectos muy tóxicos para los

organismos vivos tras una elevada exposición a ellos debido a su gran bioacumulación.

- Mercurio (Hg): Tiene efectos muy nocivos, tal vez el que más. El hecho de ser líquido a temperatura ambiente favorece el proceso de evaporación a baja temperatura, produce un gran deterioro llegando a ser mortal.
- Plomo (Pb): Puede llegar a acumularse en grandes cantidades, produce desde un ligero malestar hasta la muerte en los casos más extremos. La enfermedad por acumulación de plomo en el ser humano se conoce como Saturnismo (color azul característico).
- Cadmio (Cd): Este elemento metálico afecta al sistema enzimático, ya que dificulta el metabolismo de micronutrientes como el Zn y el Cu en el organismo.
- Níquel (Ni): Está, entre otros, presente en el tabaco y es el causante principal del cáncer de pulmón.
- Cromo (Cr): En una determinada forma (Valencia 6) se vuelve mucho más peligroso ya que aumenta su solubilidad. Irrita las mucosas, provoca daños en la piel y es denominado como agente cancerígeno.

Es importante destacar la diferencia entre emisión (liberación de un contaminante desde un foco concreto) que está regulado por las leyes estatales e inmisión (una vez disipado y transportado es, la concentración de un contaminante en un punto en concreto de la atmósfera).

2. Agua: El agua está en constante movimiento por el medio ambiente (ciclo del agua), debido a esto la contaminación del agua tiene un origen difuso al provenir de diferentes fuentes contaminantes (campos de cultivo, ganadería, industrias y urbanas). Pese a la capacidad de autodepuración del agua, debido a las grandes cantidades de contaminantes presentes debe de ser tratada antes de ser vertida de nuevo al exterior. La calidad del agua también es un estándar de calidad de vida, por ello debe monitorizarse su control en todo momento.

La contaminación de las aguas suele aparecer de una forma más evidente y ocasiona normalmente graves daños. Por tanto, a la hora de verter las aguas es necesario

realizar previamente un tratamiento de depuración. Así, se consiguen retener los principales contaminantes en unos lodos de depuración, que posteriormente también necesitarán ser tratados.

Las aguas residuales durante su tratamiento pasan por una serie de fases, en cada una de ellas se hace un proceso diferente al anterior. En primer lugar, se eliminan fácilmente los sólidos gruesos y espumas a la entrada de la EDAR (Pretratamiento). El tratamiento primario consiste en un tratamiento físico-químico para retirar la materia orgánica y partículas coloidales del agua, para ello se utilizan unos agentes coagulantes y floculantes que son capaces de estabilizar y aglutinar todas esas partículas y mandarlas al fondo tras su decantación. El tratamiento secundario consiste en realizar un proceso biológico aeróbico (asimilación de la materia orgánica por parte de los microorganismos en presencia de oxígeno, obtención de fangos activados) y anaeróbico (la carga contaminante es muy alta y se obtiene biogás para autosuficiencia energética), la presencia de bacterias y otros microorganismos se encargan de eliminar todo aquello que no se retiró durante el primer tratamiento. Los tratamientos terciarios se realizan exclusivamente cuando se quiere un nivel mayor de depuración en las aguas residuales, siendo estos muy caros y costosos ya que el agua debe estar previamente depurada.

Los fangos obtenidos durante el proceso de depuración son considerados como un residuo, es por ello que necesitan un tratamiento posterior para desactivar su poder contaminante. En primer lugar, se realiza un espesamiento, posteriormente una deshidratación y finalmente una estabilización mediante una enmienda caliza (de esta forma nos aseguramos eliminar su actividad química).

La reutilización de agua residual ha ido en aumento durante los últimos años, sobretodo en lugares con escasez de agua o bajas precipitaciones. Los principales usos son, agrícolas, industriales y domésticos.

Para establecer una adecuada calidad del agua tras los diversos tratamientos se miden multitud de parámetros, como, por ejemplo: La DBO, DQO, pH, Turbidez, Conductividad, Microorganismos, Elementos disueltos y propiedades organolépticas.

Si el agua no es para consumo, sino para reutilizarse, no se exige una calidad del agua tan estricta, ya que será empleada en riego de campos de cultivo, parque y jardines, lugares de ocio y usos industriales.

3. Residuos: Son los principales vectores de contaminación ya que son los encargados de deteriorar el estado del medio ambiente. Son generados por todos en cualquier mínima actividad que se realice, por tanto, es de especial interés retenerlos antes de que lleguen a los ecosistemas.

4. Usos energéticos: Pese a la lucha de perseguir día tras día una forma de energía limpia no se ha llegado a alcanzar por completo, por tanto, se contamina en exceso empleando cualquier forma de energía.

3.1.3. Definición de residuo

Se clasifica como un residuo a aquella sustancia o material que se obtiene al realizar una actividad industrial o consumo doméstico y que se tiene la necesidad de desechar al no ser considerado ya de interés principal, perdiendo por completo su vida útil.

Es considerado como “mejor” residuo aquel que no se genera, pero aún con el intento de minimizarlos no ha sido posible, pues la aparición de residuos con el paso de los años ha crecido de forma exponencial, principalmente por el elevado consumo de la población promovido por la obsolescencia y el bajo coste de los vertederos, llegando a darse una cantidad enorme de vertidos incontrolados.

Los vertederos son considerados ambientalmente como uno de los principales puntos de contaminación, es por ello que se está tratando de reducir su impacto restringiendo el uso de vertederos mediante tasas mucho más elevadas o exigiendo previamente un tratamiento que convierta los residuos peligrosos en residuos inertes.

Las nuevas políticas ambientales que han ido apareciendo en la Unión Europea se han enfocado principalmente en los residuos generados por las empresas del sector industrial, ya que se genera un importante volumen de residuos y además de elevada peligrosidad. Se pretende conseguir con ello que los materiales empleados por dichas

empresas tengan un ciclo de vida circular (evitando así el modelo lineal que persistía actualmente), aprovechándose al máximo hasta reducir los vertidos por completo.

La figura del gestor de residuos está ganando importancia en los últimos años, hasta el punto de aparecer un gran número de empresas capaces de tratar residuos industriales altamente contaminantes con un elevado éxito, a los cuales además se les da una otra oportunidad como materia prima secundaria en el desarrollo de otros procesos productivos, de esta manera se consiguen emplear menos recursos materiales, reducir los costes de extracción, bajar los costes de producción y disminuir la contaminación por completo.

3.1.4. *La generación de residuos*

Se establece una correlación lineal entre la renta *per cápita* y la generación de residuos, ya sean industriales o domésticos (RSU). Se produce una mayor cantidad de residuos en aquellos países con más recursos económicos, promovidos principalmente por tener un consumo exageradamente elevado.

Si nos fijamos solamente en España, cada habitante produce entre 10-20 Kg de residuos diarios. Esto supone un gran problema a medio y largo plazo, para ello se han ideado nuevas técnicas de reutilización de materiales, las cuales pretenden retornar ese material dentro del proceso productivo en lugar de considerarlo directamente como un residuo y acabar directamente en el vertedero. No es fácil para las industrias cambiar su proceso productivo de la noche a la mañana, por este motivo es algo que se está introduciendo paulatinamente quedando todavía mucho que mejorar.

Al igual sucede con el reciclaje, también tiene como objetivo final reducir los vertidos y dar una segunda oportunidad a los materiales. Sin embargo, el reciclaje no es tan directo como la reutilización ya que precisa de una serie de tratamientos que aumentan los costes con respecto a la reutilización.

La naturaleza de los residuos es muy variada, dependerá fundamentalmente de la zona geográfica en cuestión. Los que más se generan en proporción son los residuos sólidos urbanos (domésticos, fangos y escombros), seguidos de los industriales (inertes y peligrosos), residuos mineros, forestales y agrícolas/ganaderos.

Con todo esto podemos hacernos a la idea de que el concepto de estado de bienestar tiene detrás una sombra muy alargada, generada principalmente por las corrientes de un consumo de “usar y tirar”, despilfarrando una cantidad de recursos enorme de manera poco inteligente e inútil.

La implantación de nuevas tecnologías dentro de la industria persigue erradicar el problema de la generación de residuos y el elevado consumo energético durante los procesos productivos, de esta manera también se estará minimizando el impacto ambiental generado sobre los ecosistemas.

El gran desequilibrio actual que existe en desarrollo y consumo de los diferentes países en el mundo ha generado una nueva idea de consumo responsable, porque debe de permitirse también el crecimiento de aquellos países que hoy en día se encuentran en vías de desarrollo. Esto se traduce en el concepto de Desarrollo Sostenible, el cual trata de concienciar a toda la población terrestre sobre la utilización responsable de los recursos disponibles en un planeta finito como la tierra, ya que no se deben comprometer a las futuras generaciones dejándoles un problema que hemos creado nosotros en la actualidad. Es por ello que la idea a seguir es la de reutilizar ciertos materiales considerados actualmente como residuos en aprovechables (materia prima secundaria) explotando al máximo la vida útil.

3.1.4.1. Problemática Medioambiental de la Unión Europea

Cuantificar el nivel contaminación y su consecuente daño al medio ambiente de todas y cada una de las actividades realizadas por el ser humano es una labor muy tediosa, por ello la UE está centrada en analizar aquellos campos que sean más amplios, buscando así soluciones sectoriales que sean comunes y globales a la mayoría, resaltando por encima de otros problemas a los residuos como uno de los mayores impactos ambientales.

3.1.4.2. Noción de ecología industrial

El crecimiento que hubo del PIB en España en la década de los años 90 trajo consigo además un aumento en la generación de residuos. Este crecimiento se observó que no podía ser infinito ni cumplía con el concepto de Desarrollo Sostenible. Por tanto,

se han tratado de buscar alternativas realistas al tratamiento de residuos, así como a su reutilización en la misma industria o en otra semejante.

Los principales sectores industriales que generan un mayor impacto ambiental son:

- **Transportes:** Emisiones de gases efecto invernadero y óxidos de nitrógeno, ruido ambiental y destrucción del paisaje. Las perspectivas de mejora siguen lejanas pese a la aparición de nuevos vehículos menos contaminantes.
- **Energía:** Emisión de gases nocivos a la atmósfera y agotamiento de las principales reservas. Pese a la aparición durante los últimos años de energías renovables los combustibles fósiles siguen siendo la principal forma de obtención de energía.
- **Agricultura:** Aumento masivo de las malas prácticas agrícolas al fertilizar en exceso contaminando aguas subterráneas, el monocultivo favorece la pérdida de biodiversidad y existe una gran erosión en los suelos. Pese a la aparición de cultivos ecológicos los problemas persisten al ser más costosos para el agricultor.
- **Residuos:** Han aumentado su producción durante los últimos, siendo estos tóxicos y peligroso para el medio ambiente y las personas ya que no se tratan de la manera adecuada ni se les da una vida útil más larga. Se intentan minimizar, reutilizar y reciclar en la medida de lo posible pero no todos son adecuados para gestionar de manera barata, dándose todavía vertidos descontrolados.

Es por ello que la ecología industrial trata de establecer un ciclo cerrado en la vida de los materiales, al igual que la naturaleza lo hace en el ciclo de la vida, prolongando la vida útil al máximo pasando por la mayoría de usos posibles hasta considerarse finalmente como un residuo.

3.1.2. Clasificación, gestión de los residuos y bolsa de subproductos

3.1.2.1. Política de tratamiento de residuos

El crecimiento extremo en los últimos años de los diversos tipos de residuos ha creado una problemática ambiental y social a nivel global. La búsqueda de soluciones a día de hoy es primordial para atajar a la mayor brevedad posible los graves daños que

se están ocasionando. Los grandes países industrializados a nivel europeo y mundial convergen en la idea de aplicar tratamientos a los residuos como respuesta inmediata para poder revertir la situación.

En esta política de actuación acordada se instauran 3 pilares básicos que se deben cumplir:

Minimización: Debe llevarse a cabo por todos los medios en cualquier actividad o proceso productivo que se realice, la minimización es clave para disminuir drásticamente la cantidad de residuos en origen, para ello todos deben de adaptarse a los nuevos mecanismos que sean posibles para tratar de reducir los residuos generados.

Valorización: Una vez no se puede evitar y se produce un residuo como tal, debe ser tratado de la manera más óptima para una posible reutilización. Esto es conocido mundialmente como las "3 R" (Recuperar, Reutilizar y Reciclar).

La recuperación trata de perseguir que todo aquello que pueda volver a utilizarse se use. El reciclado también consigue que ciertos residuos puedan volver a utilizarse mediante un tratamiento previo, siendo muy interesante para algunos tipos de residuos. Por último, la idea que más debe prevalecer es la reutilización de los residuos ya que es la más interesante desde nuestro punto de vista.

Tratamiento: Se consideran así a todos los procesos por los que son sometidos los residuos para hacer que dejen de ser tóxicos y peligrosos convirtiéndose en residuos totalmente inertes a la hora de depositarse finalmente en un vertedero. Existen dos tratamientos principales, el físico-químico (reduce su actividad y deterioro al medio ambiente) y la incineración (su propósito es la obtención de energía).

Por ello, se penalizan más los vertidos directos al vertedero que la valorización o realización de algún otro tratamiento a los residuos al disminuir su poder de contaminación y ser aprovechados obteniendo algún beneficio.

En los últimos años se ha habido un cambio de tendencias con respecto a la política medioambiental sobre residuos. Se han reducido los vertederos drásticamente en favor de la minimización, valorización energética y reutilización.

3.1.2.2. Evolución en la gestión de residuos

El gran avance en la política ambiental dentro de la Unión Europea fue en 1972 (Estocolmo) cuando se dieron los primeros pasos para aprobar posteriormente el Primer Programa de Acción Ambiental. Las sucesiones de otros programas ambientales sentarían las bases de la nueva política ambiental comunitaria (reducción contaminación, gestión recursos naturales, prevenir la contaminación, sistemas de gestión, auditorías ambientales, desarrollo sostenible, protección ambiental etc.)

Los programas de acción más actuales introducen nuevas ideas con el fin de preservar tanto al medio ambiente como el desarrollo económico, algunas de ellas son: la internalización de los costes ambientales, responsabilidad ambiental compartida, mayor número de herramientas para la adecuada gestión o una visión ambiental dentro de la competencia más amplia.

Tras darse problemas de espacio físico (gran superficie ocupada por vertederos) y de una aguda toxicidad creada por los residuos empezaron a aparecer los primeros tratamientos sobre estos, para evitar una degradación del medio ambiente que hasta el momento estaba absolutamente descontrolada.

Aun así, la problemática ambiental de los residuos no está ni cerca de ser solucionada, provocándose todavía daños irreparables sobre los ecosistemas. La enorme diversidad de industrias, los diferentes tipos de residuos que se generan, la compleja composición y una normativa existente laxa y desigual por todos los países del mundo hacen que estos sean los principales puntos a estudiar y corregir.

Por tanto, se ha llegado al consenso de que la solución a seguir no es *que hacer con los residuos* sino, *que se puede hacer para no producir dichos residuos*. Dando así mayor importancia a la idea de minimización (evitar dependencia de tratamientos finales y adopción de nuevas tecnologías más limpias) reduciendo la generación de residuos en el origen; optimizando los procesos productivos, generación de residuos menos peligrosos, autosuficiencia energética producida por residuos, reducción y reciclaje dentro del proceso.

3.1.2.3. Las mejores tecnologías disponibles

La idea es sencilla, se pretende dentro de la actividad industrial acoger a nuevas tecnologías capaces de producir menos contaminación y que además sean viables económicamente. De esta forma se estaría produciendo la misma cantidad, con menor gasto de materia primas, menor coste energético y de calidad superior. Con la adopción de estas nuevas tecnologías aumentaríamos tanto la competitividad entre empresas como la protección del medio ambiente.

Los principales sectores donde se deberían implantar estas tecnologías son industrias que produzcan residuos extremadamente contaminantes, fomentando generar menos residuos, bajar las emisiones atmosféricas y reducción de materias primas/agua/energía.

3.1.2.4. Reciclaje

Consiste en una operación relativamente compleja que permite recuperar, transformar y elaborar nuevos materiales a partir de residuos en una determinada composición.

Reciclaje y residuos: Las diferentes actuaciones que han aparecido en los últimos años y que se encuentran dentro son; la recuperación, reutilización o valorización que permiten aprovechar los residuos y convertirlos en nuevos materiales, siendo una alternativa real a la materia prima tradicional y además de preservar el medio ambiente. Los residuos que más tratan de reciclarse son los industriales (elevada peligrosidad) y los residuos sólidos urbanos al producirse en cantidades astronómicas.

El ahorro de energía en el reciclaje: Para hacer del reciclaje un proceso óptimo deben de poder transportarse fácilmente los residuos desde su lugar de origen hasta la planta de tratamiento, además de controlar energéticamente los procesos, así los costes se evitan que sean especialmente elevados. Cada material presenta una mayor facilidad o complejidad a la hora de ser reciclado, por tanto, se debe tener siempre presente el factor económico a la hora de estudiar el proceso de reciclaje de los diferentes materiales.

Los límites del reciclado: Existen 2 limitaciones principales dentro del reciclado, la ecológica y la económica.

El límite ecológico es difícil de acotar durante el reciclado, pese a que la recuperación de un material sea fácil, pueden presentarse otra serie de inconvenientes y como resultado final tener un proceso de reciclaje que contamine más que utilizando materia prima.

Sin embargo, el límite económico se puede ver más fácilmente. Basta con hacer una comparativa entre el precio establecido en el mercado y los costes totales que supone la recogida del material. También se debe tener en cuenta si un material está diseñado para volver a ser reutilizado una y otra vez, frenando así el continuo agotamiento de los recursos naturales.

Debido a que todo material en forma de residuo tiene normalmente algún componente de interés se debe valorar si la cantidad presente que puede extraerse es lo suficientemente significativa para que merezca la pena realizar algún tipo de proceso de recuperación, ya que se podría malgastar más recursos de los que posteriormente se obtendrán. Así pues, un estudio completo sobre la vida del producto (fundamentalmente aspectos económicos y ambientales) es esencial para elegir si un residuo es, o no, valorizable.

Al aumentar el porcentaje de residuos valorizados aumenta también el ahorro de recursos naturales, dando lugar a un beneficio económico hasta un punto donde esos beneficios económicos decrecen. Algunas entidades están dispuestas a asumir algunas pérdidas económicas siempre y cuando se siga obteniendo beneficio ambiental.

3.1.2.5. Clasificación de los residuos

En función de las diferentes leyes en vigor los residuos pueden clasificarse de diferentes maneras, en España se clasifican en diferentes grupos. Los grupos más significativos son; Residuos Peligrosos, Residuos Inertes y Residuos No Especiales.

- Residuos Peligrosos o Especiales: Presentan características tóxicas y peligrosas por sus altos niveles de contaminantes y precisan necesariamente de un tratamiento en concreto que sea eficaz y deshabilite su efecto contaminante. Un ensayo de

lixiviación es el que determina si un residuo es nocivo o no para el medio ambiente por la facilidad de contaminar aguas y suelos.

- Residuos Inertes: Se consideran inertes si tras un periodo de tiempo no sufren ningún cambio físico-químico, es decir, no produce ningún lixiviado.
- Residuos No Especiales: Pese a sufrir ciertas transformaciones emiten productos que no son perjudiciales para el entorno ni el ser humano.

Los subproductos se obtienen fundamentalmente como residuo tras la realización de algún proceso productivo o consumo y puede emplearse de forma directa en otras etapas de la producción sin recibir casi ninguna transformación. Es un concepto relativamente nuevo y no estaba reconocido como tal hasta hace poco tiempo. Multitud de empresas han visto un nicho de mercado en el empleo de subproductos, aumentando así con ellos sus ingresos.

3.1.2.6. Los residuos tóxicos y peligrosos

Son los considerados especiales por su elevada toxicidad y tan solo en España se generan en más de 30000 focos, divididos por sectores (Industria Química, Fabricación de Productos Metálicos, Fabricación de Automóviles etc...).

La incidencia tan alta de estos residuos sobre la población y el medio ambiente obliga a replantearse la minimización de estos y a incrementar la reutilización.

3.1.2.7. Las prioridades en la gestión de residuos

La UE ha establecido una estrategia común a todos para establecer las prioridades sobre los residuos y su gestión dentro de un desarrollo sostenible.

Las pautas que se establecen son; en primer lugar, minimizar la generación de los residuos, posteriormente, enfatizar sobre la idea del reciclaje y reutilización de los materiales, finalmente tratar de mejorar los métodos de tratamiento y eliminación de contaminantes en los residuos.

- Para RSU: Se pretende un uso sostenible de los recursos, reutilizar y reciclar al máximo, aprovechamiento energético y eliminación segura. Las actuaciones

deberán hacerse sobre vertederos, mejora tecnologías limpias y envases reciclables por completo.

- Para Residuos Industriales y generados por el transporte: Prevenir la formación de residuos, reutilizar los materiales al máximo y emplear tratamientos adecuados según la peligrosidad del residuo. Para conseguir dichos objetivos se pretende actuar sobre los vertederos, incentivos económicos a empresas y mejor las tecnologías para que sean más respetuosas con el medio ambiente.

3.1.2.8. Vertido y ciclo de vida

El aumento del consumo ligado al aumento de la densidad de población ha llevado a valores inimaginables la aparición de residuos. Hasta entonces la solución más rápida y fácil era la del vertedero, ahora se ha comprobado que no era la mejor opción y se está sancionando a todo aquel que deposita sus residuos directamente en el vertedero, incitando de forma indirecta al reciclado.

En los vertederos ahora existen unas ciertas limitaciones, y no aceptan cualquier tipo de residuo, rechazando una serie de residuos:

- Residuos con Carbono Orgánico superior al 10%.
- Residuos Líquidos.
- Residuos del ámbito sanitario.
- Residuos de neumáticos.

Es así que con todas estas medidas de actuación se pretende reducir al máximo el uso de los vertederos de forma inminente.

Desde el punto de vista ambiental ha quedado demostrado que, pese a los estudios de ciclo de vida sobre los vertederos y su uso restringido, el impacto ambiental provocado será igualmente muy fuerte. Principalmente los problemas ocasionados son dos y surgen tanto de la descomposición y fermentación generadas por los microorganismos (emitiendo gases de efecto invernadero a la atmósfera) como de los lixiviados que se generan tras un tiempo llegando a contaminar aguas y suelos.

3.1.2.9. Valorización de los residuos procedentes de la industria siderúrgica y metalúrgica

La naturaleza de los residuos procedentes de la industria siderúrgica y metalúrgica es muy variada, obteniéndose una gran diversidad de residuos obtenidos en las diferentes industrias de fabricación de acero a partir de minerales.

Estas escorias generadas en los altos hornos de las industrias siderúrgicas y metalúrgicas tienen la consideración de subproductos. Dada la gran variedad de minerales y de procesos que se utilizan en estas industrias se pueden obtener escorias con composiciones físico-químicas muy diferentes.

Las escorias de los altos hornos se generan a 1600°C, presentando un estado líquido y en función del enfriamiento al que se someta, se obtendrá una estructura cristalina (procesos de enfriamiento lento, en lo que adquiere una alta dureza, generando un áridos de gran calidad que puede ser empleado en carreteras) o amorfa (obtenidas en procesos de enfriamiento rápido dando lugar un comportamiento puzolánico).

Por otro lado, la proporción química de la composición de las escorias son independiente de cristalinidad, nos indica las propiedades hidráulicas.

Es importante destacar, que las escorias son el residuo que se genera en mayores cantidades, dentro de la industria siderúrgica integral.

Las escorias enfriadas a la intemperie adquieren una estructura cristalina con una gran superficie específica (densidad entre 1,12 - 1,36 t/m³ y capacidad de absorción de agua entre el 1-16%).

A diferencia de la escoria anterior, la escoria expandida, es más porosa y ligera ($\rho = 0,8$ a 1 t/m³).

3.1.2.9.1. Cementos de escorias

Debido a que las escorias se enfrían rápidamente adquieren una estructura amorfa, apareciendo propiedades puzolánicas, dando lugar a diferentes cementos de escorias de composición variada.

- Cementos de escorias: Escorias siderúrgicas entre 60-70%

- Mezclas de Portland: Escorias siderúrgicas < 35%

Los principales componentes son: Escoria de alto horno granulada (amorfa), Clinquer (Portland) y yeso.

Los cementos de escoria desde el punto de vista energético son respetuosos con el medio ambiente, ya que se ahorra una gran cantidad de energía con respecto a los demás, siendo una buena alternativa para el futuro ya que los cementos de escoria preservan mejor las propiedades mecánicas. La mejoría de las propiedades se debe a que la escoria se hidroliza en parte, generando estructuras muy fuertes y resistentes.

3.1.2.9.2. Hormigones de escorias

Los hormigones a partir de cemento de escorias dan lugar a un material con propiedades similares a las del cemento de escorias. La resistencia mecánica de los hormigones con cementos de escoria al principio es menor que el cemento portland debido a su menor actividad, sin embargo, a largo plazo aumenta considerablemente con respecto al portland.

La temperatura es otro factor decisivo que interfiere en la resistencia, ya que la temperatura puede activar las propiedades puzolánicas, pudiendo llegar a ser un inconveniente para el uso de este material.

Otra característica interesante es la durabilidad y resistencia frente a los agentes corrosivos (pH 4 a 5,5) con respecto a los hormigones tradicionales debido a la composición del cemento de escoria y por los compuestos originados en el largo plazo.

El principal inconveniente es el transporte de estos materiales, ya que son originados en un punto en concreto (altos hornos) de un país y su peso específico es muy elevado.

3.1.2.9.3. Cemento fabricado a partir de escorias:

Con las escorias que se recogen en los altos hornos con propiedades puzolánicas se generan una serie de cementos que están normalizados. A la hora de fabricar un cemento es necesario reseñar la mayor cantidad de información relevante posible, como, por ejemplo:

- Especificaciones químicas: Componentes y composición.
- Especificaciones físicas: Fracción de molido, Tiempo de fraguado y expansión en agujas.
- Especificaciones mecánicas: Resistencia mínima a flexo tracción y compresión.
- Usos indicados.
- Contraindicaciones.
- Precauciones.

3.1.2.9.4. Escorias como sustituto de la grava

Para la fabricación de hormigón de escoria en detrimento de las arenas y gravas de río debe compensarse la porosidad para establecer una relación adecuada y conseguir grandes espesores, fundamentalmente para emplearse en la base de carreteras. Esta corrección no incrementa los costes ya que la obtención de este subproducto (escorias) es relativamente barata.

Se han llevado a cabo multitud de ensayos con la idea de garantizar la calidad del hormigón ya que la escoria puede dar resultados muy variables entre diferentes lotes. Estas diferencias entre las escorias se deben a la presencia de componentes secundarios, por ejemplo; formación de gases, efecto sobre el fraguado, cantidad de CaO y MgO.

Los ensayos que se llevaron a cabo sobre las probetas debían tener siempre una misma composición y tamaño de partícula, para poder obtener resultados concluyentes.

Se observó tras la fase experimental que presentaba una baja resistencia mecánica durante los primeros días, la cual posteriormente aumentaba ostensiblemente con el tiempo hasta superar con creces a la resistencia mecánica del hormigón tradicional. La resistencia media obtenida es de 245 Kg/cm² (compuesto por cemento de escoria de alto horno, agua, escoria seca, arena y grava todo ello a una determinada composición).

3.1.2.9.5. Reciclado por fusión de escorias de hornos eléctricos

Existen unos hornos especiales equipados con electrodos de grafito llegando a trabajar a una temperatura de 1600°C, son capaces de transformar las escorias de los altos

hornos en lana mineral. Es necesario que estén bien aislados térmicamente para su correcto funcionamiento. La buena conductividad térmica que poseen las escorias reduce drásticamente el consumo energético durante el proceso de transformación, permitiendo la valorización en las industrias de las escorias por fusión. Esta misma técnica de valorización se aplica para la vitrificación de cenizas volantes, tratamiento de escorias provenientes de incineradoras y la destrucción de residuos que contienen amianto.

3.2. Producción de escorias de horno de arco eléctrico y escorias de horno cuchara

3.2.1. Origen

Durante el transcurso de fabricar el acero (común o especial) en las acerías de alto horno eléctrico se constituye de dos etapas diferentes. En primer lugar, se da la metalurgia primaria que trata la fusión de la materia prima, posteriormente comienza la metalurgia secundaria donde se realiza un afinado del baño fundido primero en el horno eléctrico y acabando en el horno de cuchara.

La chatarra o el acero es la principal materia prima que se utilizan en la fabricación de acero en hornos de arco eléctrico. Eventualmente puede emplearse en menor cantidad fundiciones de mineral de hierro o ferroaleaciones.

La fusión incluye a su vez otras vías; la oxidación (eliminación de impurezas), defosforación y formación de escoria espumante (concentra a todas las impurezas). Al finalizar se obtienen las escorias negras.

Durante el afinado también se recogen otras vías; la desoxidación (elimina óxidos metálicos), la desulfuración y descarburación del acero. El fundido del horno eléctrico se lleva al horno cuchara y se cubre con una escoria (escoria blanca).

3.2.2. Volumen y distribución

El número de acerías de horno eléctrico que funcionaban en España hasta el año 2011 eran 24, en el año 2005 se produjeron 13,6Mt de acero (12,4Mt común y 1,2 inoxidable). Las comunidades autónomas que más produjeron fueron País Vasco, Cataluña, Aragón y Andalucía.

Sabiendo la cantidad de escorias que se generan a partir de una tonelada de acero, se puede estimar la cantidad de escoria negra y blanca que anualmente se origina, siendo la negra muy superior a la blanca.

3.2.3. Valorización

3.2.3.1. Propiedades

- Escorias negras: En la fusión con horno de arco eléctrico se obtiene acero líquido, sobre su superficie se encuentran las escorias negras.

La composición de la escoria negra varía en función de la chatarra empleada. Los porcentajes de su composición química oscilarán debido a esa variabilidad.

Las escorias estudiadas en España presentan las siguientes características de composición química y propiedades físicas.

El enfriamiento de las escorias, una vez se han recogido del horno, puede realizarse mediante diferentes alternativas.

- Verter la escoria en el suelo de forma directa y enfriar con agua para su posterior manipulación. Queda una escoria muy porosa en estado vítreo y de tamaño pequeño.
 - La escoria se enfría al ponerla en un cono de fundición bajo la piqueta del horno eléctrico. Se enfría por completo al pasarla a una fosa. En este caso la escoria recogida no es tan porosa, pero si más cristalina que anteriormente.
 - Exclusivamente se vierte sobre un cono de fundición, dándose en este caso el enfriamiento más lento de todos. La escoria al final será muy compacta, poco porosa, de elevada dureza y muy cristalina.
- Escorias blancas: Proceden de la fase de afino. En su composición aparecen metales pesados (Cr, Zn o Pb) en porcentajes muy bajos y presentan un tamaño de partícula muy reducido. Los ensayos químicos a los que se han sometido desvelan tanto su composición como propiedades físicas.

3.2.3.2. Procesamiento

Para la valoración de escorias negras existen varias estrategias que se han llevado a cabo, se necesita una adecuación antes de decidir su uso.

- Uso en cementeras como aporte de hierro.
- Uso en firmes de pavimento con mezcla bituminosa.
- Uso en bases de carreteras.
- Árido para hormigón.

Con las escorias blancas solo existe una posibilidad de valorización, esta alternativa se realiza en las fábricas de cemento sustituyendo las margas por estas escorias. Una de las ventajas es que no precisa de ningún tratamiento previo para su uso.

3.2.3.3. Propiedades del material procesado

3.2.3.3.1. Escorias Negras

Los áridos de escorias negras de acería (hornos eléctricos de arco) tienen una densidad relativa superior en comparación con los áridos naturales. Esto repercute negativamente en los costes asociados al transporte.

Con respecto a la absorción de agua los valores de la escoria están entre el 1% y 4% en volumen. Repercutirá significativamente si el árido se somete a ciclos prolongados de hielo/deshielo o sequedad/humedad.

Las partículas son consideradas duras, teniendo un coeficiente de desgaste inferior al resto de materiales.

Como en su composición química están presentes los óxidos de cal y el magnesio libre se consideran que tienen un origen expansivo (la cal se hidrata rápidamente originando cambios de volúmenes muy significativos en un breve espacio de tiempo, el Mg también llega a hidratarse, pero es mucho más lento).

Los lixiviados producidos por estas escorias llegan a tener un pH muy básico (11 o superior), originando problemas de corrosión sobre el acero y el aluminio.

La precipitación de los carbonatos es otro problema al colmatar los sistemas de drenaje.

3.2.3.3.2. Escorias Blancas

Entre los principales componentes se encuentran los silicatos (tricálcico y bicálcico), aluminoferrito tetracálcico, aluminato tricálcico y ferrito dicálcico.

3.2.3.4. Aplicaciones

- Obras de tierra y terraplenes: Las escorias blancas pueden usarse para estabilizar suelos o para la construcción de terraplenes (ambos usos en fase de investigación y desarrollo).
- Firmes de carreteras: Si las escorias negras están tratadas adecuadamente sirve perfectamente para ser utilizadas como áridos en carreteras al cumplir todas las indicaciones exigidas. Existe un riesgo de expansión del material por hinchamiento y debe utilizarse en las cantidades adecuadas para no generar posteriormente problemas (evitar su uso en capas estabilizadas con cemento). Para conseguir una mejor extensión y recubrimiento se mezclan las escorias con materiales más finos.

Las escorias de áridos que se han tratado adecuadamente sirven para realizar mezclas bituminosas al sufrir poco desgaste siendo fantásticos para superficies de rodadura.

- Edificación y obra pública: El uso de las escorias negras sería en la industria que se encarga de la fabricación de cemento (aporte de hierro o como árido).
 - Cementeras: Esta alternativa desde el punto de vista medioambiental no presenta ningún tipo restricción por la legislación, por tanto, su uso está permitido, obteniéndose así un producto final de buena calidad.
 - Árido para morteros: Precisa de una molienda previa para equiparar la granulometría con los áridos tradicionales. El material resultante presenta buena resistencia a la compresión.

- Árido para hormigón: Para su uso debe llevarse a la granulometría adecuada y realizar una estabilización y envejecimiento de las escorias para evitar que se den fenómenos de expansión. La resistencia de este tipo de hormigones (con escorias negras) suele ser menor durante los primeros días, sin embargo, con el paso de estos el cemento adquiere incluso mayor resistencia que los hormigones tradicionales.
- Cementera de escorias blancas: Su valorización trata de ser reutilizadas por parte de las cementeras para hornos rotativos. Por su bajo contenido en hierro no se usan como aporte sino en sustitución de las margas en las cementeras. Está limitado el uso de estas escorias blancas principalmente por dos motivos; la cantidad de magnesio al influir negativamente en sus propiedades y también por las posibles emisiones al medio ambiente de los fluoruros.

3.2.3.5. Obras realizadas

En España se han realizado algunos tramos para comprobar el funcionamiento de las escorias en mezclas bituminosas, fundamentalmente en las capas de rodadura.

Las primeras experiencias han dado unos resultados positivos, quedan recogidos algunos tramos de carretera realizados con escorias procedentes de acería de horno eléctrico.

En los estudios se ha estimado la capacidad que tienen las escorias para utilizarse en cementeras, siendo la cantidad a valorizar muy elevada (negras 85000 t/año y blancas 100000 t/año).

El uso de escorias negras en hormigón también se ha empezado a aplicar en España para cimentar muros, se consigue valorizar cerca de 800000 t/año de escorias negras y el producto final resultante presenta una calidad óptima. De esta forma se obtienen construcciones innovadoras (al usar materiales nuevos que ya no se consideran residuos) y sostenibles.

3.2.4. Consideraciones Ambientales

En nuestro país, la Ley 22/2011 de residuos y suelos contaminados establece que los residuos que se consideran peligrosos o no peligrosos deberá hacerse conforme la Lista Europea de Residuos establezca.

Las escorias de acería de horno de arco eléctrico se encuentran en la Lista Europea de Residuos como “Residuos de procesos térmicos” dividiéndose en; residuos de tratamiento de escorias y escorias no tratadas.

El tratamiento adecuado de un material como las escorias es fundamental para obtener una serie de beneficios, principalmente de dos partes, los que generan el residuo y de la sociedad en general, ya que:

- Disminuyen los costes de vertido sustancialmente y aumenta el ahorro de materia prima al poder reutilizar en gran cantidad los subproductos generados de acería.
- Minimización del impacto ambiental al no ocupar los espacios que están destinados a vertederos, evitando posibles contaminaciones de suelos y aguas.
- Aumento de la calidad ambiental en las zonas industrializadas.

Siempre que los ensayos de lixiviación lo permitan y no se superen los límites establecidos, las escorias negras procedentes de acería de horno de arco eléctrico podrán emplearse como material de construcción (capas granulares o mezclas bituminosas).

3.2.5. Aspectos económicos

En los inicios la escoria negra no se valorizaba, era transportada y depositada en los vertederos destinados a residuos inertes (dependiendo del vertedero los costes por tonelada de residuos variaban). Afortunadamente la aparición de nuevas alternativas ha permitido la reutilización de este subproducto como material de construcción.

Las escorias blancas también se vertían en los vertederos juntos a las negras. Sin embargo, hoy se están valorizando principalmente en las cementeras.

3.3. Investigaciones recientes sobre escorias de horno eléctrico y escorias de horno cuchara

La escoria de horno de arco eléctrico como se ha detallado es un subproducto de la industria siderúrgica, más concretamente de los hornos de arco eléctrico en la etapa de fusión. Estas escorias han sido utilizadas en infraestructuras viales como árido en pavimentos de hormigón [33,34], demostrando un buen comportamiento mecánico del material resultante. También se han utilizado como sustitutos de áridos naturales en distintos porcentajes en mezclas bituminosas en caliente, mostrando excelentes resultados en cuanto a trabajabilidad, rigidez y resistencia a la fatiga [35,36]. Al mismo tiempo, se ha desarrollado una mezcla bituminosa templada con escoria de horno de arco eléctrico [37,38], reflejando una mejora en las propiedades mecánicas de las mezclas bituminosas fabricadas [39]. Incluso se han realizado mezclas bituminosas SMA con sustitución parcial del árido por escoria de horno de arco eléctrico [40], demostrando que las mezclas bituminosas con escoria eran más resistentes al agrietamiento a bajas temperaturas que las que incorporaban áridos naturales.

Además, la investigación actual ha evaluado la idoneidad de la escoria de horno de arco eléctrico como agregado árido para mezclas bituminosas con betún [41] o emulsión de betún [42]. Todas estas investigaciones coinciden en la calidad de la escoria como árido para mezclas bituminosas y los resultados aceptables que proporciona. A su vez, las fibras de celulosa se han utilizado en mezclas bituminosas con emulsión bituminosa [43] y con betún [44], reflejando el aumento del porcentaje de ligante que se puede obtener y el aumento de la vida útil. Incluso se han desarrollado mezclas bituminosas con escoria de horno de arco eléctrico, betún y fibras de celulosa [45], obteniendo una buena resistencia mecánica de las mezclas desarrolladas. Sin embargo, ninguna de las investigaciones realizadas coincide con las mezclas bituminosas realizadas en esta investigación, así como la optimización máxima de las propiedades resistentes que poseen las escorias de horno de arco eléctrico en las mezclas conformadas. Además, estas escorias han sido combinadas con otros residuos como las fibras de celulosa desechadas de la industria papelera para proporcionar a la mezcla bituminosa unas características excepcionales físicas y mecánicas difícilmente alcanzables con materiales convencionales.

Las escorias de horno cuchara, a diferencia de las escorias de horno de arco eléctrico, no se han utilizado en tantas investigaciones. No obstante, su granulometría fina, junto con las propiedades cementantes corroboradas por diferentes autores, muestran la aptitud de este material para su utilización como filler. Sin embargo, la presencia de algunos óxidos metálicos puede causar expansión volumétrica del material cuando se hidrata, y se requirió monitoreo de laboratorio durante el estudio [46,47].

Entre las escasas aplicaciones de la escoria de horno cuchara se encuentra su adición al cemento [48,49], como sustituto de la arena en los morteros [50–53], como sustituto del hormigón [54] y como estabilizador de materiales arcillosos debido a su alto contenido de cal [55] o al tratamiento del agua [56,57]. Su idoneidad como material con características cementosas ha sido confirmada por los casos de éxito de su incorporación a cementos, morteros y hormigones.

Por otro lado, el uso de escoria de hornos cuchara en pavimentos ha sido limitado y solo se ha realizado a nivel de investigación. En la incorporación de las escorias a suelos de baja calidad para su estabilización [58] se obtuvieron resultados aceptables, sin problemas de expansividad en el material tratado, y una mejor calidad del suelo. A su vez, las escorias de hornos cuchara se utilizaron para la fabricación de pavimentos de hormigón [59], reflejando resistencias adecuadas después de las pruebas, e incluso se utilizaron como bases de carreteras o subbase [60]. En el campo de la mezcla asfáltica en caliente, se ha llevado a cabo una investigación en la que se sustituyó la carga por escoria de horno cuchara [61], obteniendo buenas propiedades de rigidez, resistencia a la rotura por tracción y resistencia a cargas repetidas. Al mismo tiempo, la sustitución de una alta proporción de árido calizo por escorias en mezclas asfálticas calientes mostró una mejora considerable en las propiedades mecánicas en comparación con una mezcla bituminosa tradicional. Finalmente, el desarrollo de asfalto poroso con escoria de horno cuchara y betún [62] mostró una excelente adherencia del betún con la escoria, dando como resultado buenas propiedades mecánicas. Sin embargo, no existe ninguna investigación que se refiera al uso de escoria de hornos cuchara en mezclas bituminosas con emulsión bituminosa y reutilización de pavimentos asfálticos (RAP), proceso desarrollado en esta investigación.

Como se ha detallado anteriormente se puede observar que la producción de escorias de horno de arco eléctrico y escorias de horno cuchara supone actualmente un problema ambiental, dada su enorme cantidad de producción y su composición química particular. Es por ello que diversos investigadores han desarrollado líneas de investigación para encontrar una aplicación correcta de este tipo de subproductos. También cabe destacar que la mayoría de las investigaciones se centran en el sector de la construcción ya que este sector es uno de los más demandantes de materia primas y en consecuencia uno de los más contaminantes. Por lo tanto, es idónea la aplicación de las escorias como materiales para construcción de carreteras, evitando así su deposición en vertedero, reutilizándolas como materia prima y evitando la extracción de materiales vírgenes. Cabe destacar que todas las investigaciones presentadas coinciden en varios aspectos fundamentales de las escorias que son corroborados en esta tesis y aprovechados al máximo para la obtención de materiales de calidad superior. Las cualidades en las que coincide la diversidad de investigadores son la excelente forma de partículas y resistencia mecánica de las escorias de horno de arco eléctrico o escorias negras, así como las propiedades cementantes de las escorias de horno cuchara o escorias blancas. Por lo tanto, las mezclas bituminosas presentadas maximizarán estas particularidades con la función que cada subproducto desempeña en la mezcla bituminosa.

3.4. Mezclas bituminosas para conservación de carreteras

El mantenimiento del pavimento es una de las principales actividades dentro de las infraestructuras viarias. Es común diseñar y construir pavimentos con altas prestaciones y grandes inversiones que posteriormente no se cuidan en su vida útil. Por otro lado, el pavimento es un elemento que sufre a lo largo de su vida útil, ya sea por las cargas de tráfico pesado, vehículos o exposición a los elementos [63,64]. En consecuencia, las características que tenía al inicio de su construcción no se han mantenido inalteradas en el tiempo. El trabajo de mantenimiento es obligatorio.

Estas tareas de mantenimiento no siempre se realizan correctamente. La baja disponibilidad de inversiones, las consideraciones no técnicas en la inversión y el paso del tiempo hacen que estas tareas no se desarrollen [65]. Sin embargo, la falta de un

adecuado mantenimiento en el pavimento propicia que el deterioro producido crezca exponencialmente, por lo que el costo de estas labores en los años siguientes aumentará rápidamente.

Ante esta problemática, es fundamental desarrollar actividades de mantenimiento que prolonguen la vida útil del pavimento, se realicen de forma regular y no supongan un elevado coste económico.

Además, el envejecimiento del pavimento se manifiesta de diferentes formas [66], no siempre similares, y dependiendo en gran medida de los materiales utilizados y del proceso de ejecución seguido. Un pavimento muy envejecido presentará grietas superficiales con formas irregulares e implicará un agotamiento estructural del pavimento. Sin embargo, también es común encontrar un pavimento que no tenga estos defectos pero que tenga un coeficiente de fricción muy bajo. En otras palabras, el paso continuo de vehículos desgasta la capa superficial y hace que la macrotextura y microtextura del pavimento pierda el rozamiento necesario de los neumáticos de los vehículos [67]. En consecuencia, esto disminuye significativamente la microtextura del árido grueso y crea una superficie insegura para el tráfico, más aún en la época de lluvias.

Por lo tanto, son diversos los defectos que pueden aparecer en las infraestructuras por el paso del tiempo y la circulación continua de vehículos, así como el sometimiento del pavimento a las condiciones climáticas. Dependiendo del tipo de problema existente en la infraestructura las actuaciones que deben realizarse serán diferentes.

En esta tesis se presentan cuatro tipos de mezclas bituminosas para diferentes defectos del pavimento en las que se utilizan escorias de horno de arco eléctrico y/o escorias de horno cuchara. De esta forma puede evaluarse la calidad de las escorias mencionadas para las labores de mantenimiento en carretera.

Para una mejor comprensión de los tipos de mezclas en los sucesivos apartados se detalla la problemática que se produce en la infraestructura, la forma de detectarla, así como la técnica utilizada para su arreglo o solución.

3.4.1. Firmes reciclados in situ con emulsión bituminosa

El pavimento de carreteras realizado con una mezcla bituminosa tiene buena resistencia, adherencia y comodidad para los conductores, pero estas características pueden disminuir significativamente al final de su vida útil. Sin embargo, las características estandarizadas y aglutinantes de los áridos dan la calidad del material envejecido para su uso en nuevas mezclas bituminosas. El envejecimiento del pavimento se caracteriza por la formación de fisuras de forma irregular y la pérdida de adherencia macroscópica de los vehículos. La simple eliminación del pavimento envejecido en un vertedero sin reutilizarlo desperdicia cantidades elevadas de material, lo que supone un fuerte impacto ambiental negativo [68]. Idealmente, se desarrollarían mezclas que utilicen este material envejecido para lograr las cualidades requeridas en la construcción de la nueva infraestructura, reduciendo el uso de nuevos materiales vírgenes en la construcción de infraestructura y de combustibles fósiles para producir y transportar la nueva mezcla [69,70] —en resumen, una menor emisión de gases de efecto invernadero y un menor impacto ambiental. Algunos autores denominan a este resultado pavimento sostenible, gracias al aumento de la vida útil de la infraestructura, y al ahorro en términos de costes económicos y medioambientales [71–73].

La falta de sostenibilidad es un problema en el sector de la construcción, aunque puede mitigarse ligeramente mediante la recuperación de pavimento envejecido para crear una nueva mezcla bituminosa. Desechar la capa envejecida en un vertedero y producir una nueva mezcla bituminosa debe rechazarse como idea, debido a su alto impacto en el medio ambiente y a la exigencia actual de optimizar los recursos.

En este proceso se han utilizado varias técnicas. Cada técnica tiene sus ventajas y desventajas, pero cada una utiliza todo o parte del material de carretera fresado y envejecido.

Estas técnicas se clasifican en dos tipos principales: caliente y fría, según se caliente o no la mezcla bituminosa. En el reciclado en caliente en planta, la mezcla bituminosa envejecida de la carretera se fresa, se transporta a la planta de fabricación, se mezcla con material virgen y se fabrica a temperaturas de 180 °C. Luego se transporta al sitio del proyecto de construcción de la infraestructura, se extiende y se compacta. A

diferencia del reciclado en caliente, el reciclado en frío se realiza a temperatura ambiente, reduciendo el consumo de combustibles fósiles y la emisión de CO₂ requerido en el calentamiento de la mezcla. Los procesos basados en plantas de reciclado central en frío siguen etapas de implementación similares a las del reciclaje en caliente. Pero con una diferencia, que la temperatura es mucho más baja, el reciclado en frío in situ no requiere del transporte de la mezcla fresada a una planta de fabricación, y la nueva mezcla se fabrica con el 100% del pavimento envejecido reutilizado en la nueva infraestructura [74].

El reciclado en frío in situ, en el que se basa este estudio, tiene una serie de ventajas obvias sobre otras técnicas. Las ventajas ambientales incluyen la reducción del transporte en vehículos pesados, menores emisiones de CO₂ y un menor consumo de combustibles fósiles. Las ventajas operativas incluyen [75,76] poca influencia del tráfico, el mantenimiento de la geometría de la carretera, un alto ritmo de construcción y seguridad. Estas ventajas se derivan principalmente de las prácticas eficientes involucradas en la ejecución de todas las operaciones de fabricación de pavimentos, desde el fresado y mezclado con emulsión, agua y otros aditivos hasta el extendido y compactación.

En base a lo anterior, el reciclado en frío in situ con emulsión bituminosa disminuye el impacto ambiental, principalmente debido a una menor extracción de materiales vírgenes y un menor uso de maquinaria en el transporte y fabricación de la mezcla asfáltica. Estas mejoras reducen significativamente la emisión de gases de efecto invernadero como CO₂ y NO_x [77].

El reciclado de pavimentos también tiene algunas desventajas que deben tenerse en cuenta durante el diseño. En primer lugar, no todos los pavimentos se pueden reciclar; algunos pavimentos han sufrido deformaciones plásticas y no se recomienda su utilización, ya que es probable que los problemas repercutan en el nuevo pavimento creado. Además, dado que se fabrica el nuevo pavimento reciclado con emulsión bituminosa, se requiere tiempo de curado para lograr propiedades mecánicas óptimas. Por lo tanto, incluso está permitido abrir la carretera al tráfico después de la recuperación del pavimento, pero se requiere tiempo suficiente antes de que se obtengan

las características mecánicas finales [78]. Por tanto, es fundamental elegir una emulsión bituminosa compatible tanto con el material a tratar como con los tiempos de rotura y curado previstos.

En segundo lugar, la dificultad de reproducir las características finales del pavimento proyectado en el laboratorio [79,80], la variabilidad de los materiales y la dependencia de una ejecución adecuada dificultan la determinación anticipada del comportamiento final de la mezcla de reciclado en frío in situ, limitando así su uso a carreteras con poco tráfico [81].

En varios casos, sin embargo, el estudio de laboratorio adecuado y la ejecución precisa de la técnica ha llevado a la creación de pavimentos con características notablemente mejores a las esperadas, produciendo una mezcla sostenible con buenas características mecánicas, incluso para alto tráfico [80,82]. Se han utilizado con buenos resultados aditivos como el cemento [83] e incluso subproductos industriales como las cenizas volantes de las centrales térmicas de carbón [84].

Con base en la investigación anterior, la obtención de características mecánicas óptimas en el reciclado in situ en frío con emulsión bituminosa requiere la incorporación de un aditivo con características cementosas para lograr tres objetivos: resistencia adecuada del pavimento durante el tiempo de curado; ajuste granulométrico del pavimento asfáltico recuperado; y material que maximiza la resistencia final de la mezcla. Por tanto, este proyecto utiliza escoria de horno cuchara como corrector de granulometría y aditivo para mejorar las cualidades mecánicas a corto y largo plazo.

En base a lo anterior, este estudio analizó el reciclado en frío in situ con emulsión bituminosa y la incorporación de escoria de horno cuchara como aditivo para mejorar la granulometría y proporcionar características especiales de resistencia. Por lo tanto, el estudio exploró el uso de subproductos industriales como sustituto de material virgen y también para alargar el ciclo de vida de un pavimento. Además de reducir el uso de materiales vírgenes en la formación de la mezcla asfáltica, el uso de técnicas de frío in situ reduce significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero y el consumo de combustibles fósiles. Este proyecto buscó optimizar el uso de recursos y técnicas de

fabricación, al tiempo que se reducen los residuos industriales. Por tanto, el estudio se realizó en el marco de una economía circular.

3.4.2. Asfalto poroso con emulsión bituminosa

Los recientes desarrollos en la sociedad, incluida una mayor sensibilidad ambiental y, en consecuencia, regulaciones ambientales más restrictivas, han creado circunstancias ideales para la formulación de nuevos materiales que son más sostenibles para el medio ambiente [85]. Estos materiales representan un nuevo paradigma de trabajo, con el único propósito de proporcionar materiales con características similares o superiores a los tradicionales, pero con una optimización en su proceso de fabricación y en el uso de materias primas. Por tanto, reducen significativamente la huella de carbono en su evaluación del ciclo de vida.

El presente estudio se basa en lo anterior, sin embargo, su campo de actuación está restringido a carreteras de tráfico medio y bajo [86]. El estudio de este tipo de infraestructura está motivado por dos factores; por un lado, este tipo de infraestructura recibe la menor inversión en su construcción y mantenimiento, por lo que la calidad del pavimento no siempre está asegurada durante su vida útil. Por otro lado, las vías de tráfico medio y bajo representan un porcentaje significativo del total de vías, y son las más propensas a producir accidentes y mortalidad.

Sobre esta base, la base es la creación de pavimentos de calidad, económicos y con técnicas lo más sostenibles posible. Por tanto, la granulometría discontinua de la mezclas bituminosas con emulsión bituminosa es la solución más adecuada a este problema [87].

Las mezclas bituminosas de granulometría discontinua con emulsión bituminosa son mezclas bituminosas con bajas emisiones de CO₂, como resultado del uso de emulsiones bituminosas que permiten su fabricación y aplicación a temperatura ambiente [88,89]. Al mismo tiempo, proporcionan una superficie de carretera cómoda y segura para los vehículos y poseen varias características particulares [90]. Entre estas características se encuentran: la capacidad de drenar el agua, debido a su alto contenido de huecos; alta resistencia al deslizamiento, proporcionada por su macrotextura derivada del uso de áridos principalmente gruesos; la reducción de las emisiones

sonoras, ya que tiene un alto contenido de huecos que es capaz de absorber el ruido [91,92]; así como una cómoda mezcla bituminosa en términos de regularidad, seguridad y sonoridad para los conductores [93–95]. Se trata, por tanto, de mezclas bituminosas de muy buenas características que, sin embargo, no siempre se han desarrollado con éxito, debido al uso de materiales de baja calidad o procesos de ejecución inadecuados [96].

Todas las características mencionadas se derivan de su clasificación, que está compuesta principalmente por árido grueso y, en menor medida, por árido fino. Por un lado, el árido grueso trabaja por fricción resistiendo las importantes cargas de tráfico, y por otro lado, el árido fino en conjugación con el betún de la emulsión aporta las características adecuadas para resistir las tracciones creadas por el tráfico. Por lo tanto, son elementos esenciales para la producción de una mezcla bituminosa apta para el tráfico y para la durabilidad. En ambos elementos, se han realizado importantes mejoras en esta investigación para obtener un producto de máxima calidad, diferenciable del convencional [97].

3.4.3. Tratamientos superficiales para el aumento de la adherencia

Como se ha comentado anteriormente, el envejecimiento del firme se manifiesta de diferentes formas. El pavimento no tiene que perder sus características estructurales y mecánicas para ser renovado o tratado, sino que con la simple pérdida de adherencia ya disminuirá enormemente la seguridad para los vehículos. Este hecho se debe principalmente a que los áridos utilizados en la mezcla bituminosa, por no tener resistencia al pulimiento, o una resistencia adecuada, o simplemente porque, durante un período prolongado de uso, han perdido la rugosidad superficial a acondicione una superficie de carrera cómoda y segura.

La solución a este tipo de problemas se encuentra principalmente en la pavimentación con tratamientos superficiales. Existen otro tipo de técnicas para corregir el problema del rozamiento, pero la facilidad de ejecución de esta técnica, la rápida apertura al tráfico y la fabricación de la mezcla bituminosa a temperatura ambiente la convierten en una excelente solución [98].

El tratamiento superficial es una mezcla bituminosa que contiene principalmente árido (árido grueso en alta proporción), emulsión bituminosa, agua y aditivos. Su

extensión es rápida sobre el pavimento realizando el mezclado y compactación estandarizados por la misma maquinaria. A su vez, la apertura al tráfico suele ser en un corto período de tiempo, evitando así la interacción con el tráfico y problemas de seguridad.

Este tipo de mezcla, con un porcentaje importante de árido grueso de tamaño máximo de 8 mm u 11 mm, logra una capa en la superficie del pavimento de espesor reducido (siendo el espesor aproximadamente igual al tamaño máximo de árido) y con alto fricción entre el vehículo (neumático) y el pavimento. Es, por tanto, una solución ideal para la recuperación de pavimentos que han perdido parte de su rugosidad o rozamiento, pero aún presentan características estructurales suficientes para soportar las cargas del tráfico. Es decir, no es una capa estructural ni resistente; sin embargo, si existieran una serie de fisuras en el pavimento envejecido, este tratamiento podría mantener la unión de la fisura y, a su vez, evitar que el agua penetre en el pavimento provocando mayores problemas adicionales.

Por tanto, este tratamiento superficial necesita evidentemente un árido de calidad suficiente para mantener el rozamiento durante el paso continuo de los vehículos, y una adherencia adecuada a la emulsión para que no se produzcan problemas de desgarre [99]. El árido utilizado ha sido habitualmente de naturaleza silícea para obtener una mayor abrasión y resistencia.

3.4.4. Mezclas tipo SMA (Stone Mastic Asphalt)

Las mezclas bituminosas de tipo Stone Mastic Asphalt (SMA) tienen una granulometría discontinua. Esta granulometría discontinua les confiere una mayor resistencia a las deformaciones plásticas, una mejor textura de la superficie, mayor rozamiento del neumático con el pavimento [67], mayor permeabilidad para evacuar el agua de lluvia e incluso mayor absorción del ruido provocado por el contacto del neumático con el pavimento. Al mismo tiempo, la incorporación de un mayor porcentaje de betún en comparación con otros tipos de mezclas bituminosas de granulometría discontinua, le confiere una mayor resistencia a las cargas de tracción repetitivas y, en consecuencia, una vida útil más larga [63,64]. Este mayor porcentaje de betún se consigue mediante la adición de fibras. Estas fibras absorben el exceso de betún

y evitan que se exuden durante la vida útil del pavimento. Por tanto, Stone Mastic Asphalt tiene una alta calidad y resistencia adecuada para su uso en carreteras con tráfico importante durante su vida útil.

Sin embargo, la granulometría discontinua de la mezcla detallada, así como la calidad requerida, hacen necesario el uso de árido de alta resistencia. Los áridos de mayor calidad y resistencia mecánica corresponden principalmente a rocas silíceas de difícil extracción y procesamiento, que producen importantes emisiones de gas CO₂ en su extracción y desgaste continuo de los equipos durante el procesamiento [70]. Por tanto, el uso de escorias de horno de arco eléctrico de alta resistencia, con excelente forma y precio reducido [96], supone una importante reducción del impacto medioambiental [100]. Además, el recubrimiento de la escoria del horno de arco eléctrico con betún, reduce en la mayoría de los casos, la posible lixiviación de elementos contaminantes que pueda contener.

A su vez, los áridos silíceos tienen menos adherencia con el betún que los áridos calizos, principalmente por su composición química y compatibilidad entre materiales. Por ello, para ejecutar un filler que envuelva los áridos, que soporte las cargas de tracción durante la vida útil y evite la exudación de betún, se suele utilizar filler calizo o cemento. El cemento es uno de los materiales que ofrece mayor resistencia al mezclado; sin embargo, su fabricación es un proceso con un impacto ambiental significativo, ya que es una alta fuente de emisiones de gases de efecto invernadero.

Por otro lado, para que la mezcla bituminosa que contenga un mayor porcentaje de betún tenga una resistencia adecuada a las cargas de tracción repetidas y no se produzca exudación del betún, se deben incorporar fibras de celulosa. Estas fibras de celulosa, introducidas en un bajo porcentaje en la mezcla bituminosa, son capaces de retener el betún en la mezcla y formar una mastic de calidad junto con el betún y el filler.

En definitiva, las mezclas tipo SMA (Stone Mastic Asphalt) son mezclas de alta calidad, con muy buenas prestaciones mecánicas y físicas, así como con una alta durabilidad. No obstante, para su conformado se utilizan áridos de elevada resistencia, usualmente silíceos, que suponen un alto coste económico y ambiental.

4. Materiales y metodología

En este apartado se describen los materiales utilizados para el desarrollo de la investigación, así como la metodología científica seguida para la obtención de las conclusiones finales. El objetivo final de este estudio es la evaluación de la incorporación de las escorias de horno eléctrico y horno cuchara en la fabricación de mezclas bituminosas para conservación de carreteras.

4.1. Materiales

Los materiales utilizados en este proyecto son principalmente residuos y materiales comerciales. Estos materiales se detallan en este apartado definiendo su procedencia, proceso de producción y características particulares, haciendo posible la reproducción de los ensayos presentes.

Debe tenerse en cuenta que los residuos industriales de esta investigación han sido suministrados por las empresas productoras de forma inalterada. El proceso que se ha realizado a estos residuos se detalla en los apartados posteriores.

A su vez, cabe mencionar que los ensayos realizados se han ejecutado para diferentes lotes de producción de los residuos. De esta forma se ha confirmado que se mantiene las propiedades físicas y químicas de los residuos a lo largo del tiempo. Este hecho es esencial, ya que si se modificara en gran proporción las características de los residuos haría inviable la utilización de los mismos en la construcción de infraestructuras viarias, ya que se consumen grandes cantidades de materiales y podría provocar la variación de las características finales de las mezclas bituminosas. Por lo tanto, puede afirmarse que los residuos estudiados mantienen sus propiedades físicas y químicas en el tiempo, a diferencia de otros residuos como los lodos de depuración, lodos de corte, etc.

Finalmente, mencionar que las escorias de horno cuchara, las escorias de horno de arco eléctrico, las fibras de celulosa, los áridos cornéanos, la arena silícea, el firme reciclado y el filler calizo, han sido secados a la temperatura de 105 ± 2 °C durante 24 horas para eliminar la humedad existentes en ellos. La eliminación de la humedad de los materiales tiene por objetivo no introducir más variables a la metodología y

proporcionar unos resultados objetivos. En el posterior proceso de fabricación en industria simplemente debería tenerse en cuenta esta humedad de los materiales para realizar las correcciones oportunas, si así fuera necesario.

4.1.1. Escorias de horno de arco eléctrico

Las escorias de horno de arco eléctrico o escorias negras (EAFS) utilizadas proceden de la industria siderúrgica ubicada en la región de Andalucía, España. Estas escorias presentan una granulometría continua con diferentes tamaños de partículas hasta un máximo de 22 mm. La existencia de partículas de tamaño inferior a 0.063 mm es ínfima, existiendo principalmente árido grueso y fino, en menor cantidad. Se puede observar una forma irregular de las partículas por los procesos de formación de las mismas.

Cabe destacar que las escorias de horno de arco eléctrico se forman en la industria metalúrgica en la primera etapa denominada de fusión y en el horno de arco eléctrico. Estos hornos son alimentados con chatarra de hierro dulce o acero. En esta etapa de fusión se realizan una serie de fases como la oxidación, para eliminar impurezas de manganeso y silicio, la desfosforación y la formación de escoria espumante. En esta escoria espumante se acumulan todas las impurezas. La escoria es extraída, formando tras su enfriamiento y riego con agua la escoria de horno de arco eléctrico.

La empresa productora posteriormente tritura el material y realiza una económica clasificación del tamaño de partículas para rellenos de terraplenes. Estas escorias son las utilizadas en la presente investigación.

A su vez, la misión de las escorias de horno de arco eléctrico es la de sustituir el árido grueso y fino utilizado tradicionalmente. Por lo tanto, proporciona el esqueleto mineral necesario de la mezcla bituminosa, debiendo tener la resistencia suficiente para soportar las cargas repetidas de compresión del tráfico, así como la rugosidad para proporcionar una buena fricción entre el neumático y el pavimento. Las escorias de horno de arco eléctrico fueron lavadas y tamizadas por diferentes tamices, obteniendo las fracciones granulométricas necesarias para el conformado de la curva granulométrica.

4.1.2. Escorias de horno cuchara

Las escorias de horno cuchara o escorias blancas (LFS) proceden, al igual que las escorias de horno de arco eléctrico, de la zona de Andalucía, España. Estas escorias presentan un tamaño de partícula muy fino derivado directamente de su proceso de formación.

Las escorias de horno cuchara se producen en la etapa de afino, posterior a la etapa de fusión en la cual se producen las escorias de horno de arco eléctrico. La etapa de afino incluye una serie de fases como la desoxidación, permitiendo eliminar los óxidos metálicos del horno, la desulfuración y la descarburación del acero. Para que se produzca esta fase, el líquido procedente del horno de arco eléctrico se traspasa al horno cuchara, se cubre con escorias y se agita continuamente con el soplado de gas inerte, usualmente argón. Finalmente se elimina esta escoria de mucho menor tamaño de partícula y se deposita en las inmediaciones para su enfriamiento.

La escoria de horno de cuchara ha sido tomada directamente de la industria productora como muestra inalterada y servirá principalmente como filler de las mezclas bituminosas conformadas. Estas escorias de horno cuchara proporcionan las deseadas características cementantes corroboradas por diferentes autores.

4.1.3. Firme reciclado

El firme reciclado pertenece a la capa de rodadura de la carretera de unión entre las localidades Linares y Jabalquinto, situada en territorio español. La carretera en la cual se encontraba el firme contaba con un tráfico medio – bajo de vehículos pesados, así como un agrietamiento de la capa de rodadura en forma de tramas irregulares. Este agrietamiento refleja el agotamiento estructural de la capa en estudio por envejecimiento del betún sin llegar, por otra parte, a presentar problemas de deformaciones importantes debidas a un mal diseño de la mezcla inicial o una mala ejecución de la explanada. El firme correspondiente a una mezcla bituminosa en caliente, fue fresado con maquinaria similar a la que se ejecutaría en obra para la obtención de la muestra estudiada. Los

ensayos realizados para la corroboración de la aptitud del firme para su reciclado se detallarán en la metodología.

4.1.4. Arena silíceea

La arena silíceea pertenece, al igual que las escorias, a la zona de Andalucía, España. Proceden del machaqueo de rocas silíceas y se ha utilizado tradicionalmente en tratamientos superficiales. Esto hecho se debe a la buena resistencia que ofrecen, así como la adhesión adecuada con la emulsión bituminosa. El tamaño máximo de árido de la arena es de 6 mm, mostrando una curva granulométrica continua. A su vez, la densidad de las partículas es de aproximadamente 2650 kg/m³, siendo este valor usual en arenas similares. Posteriormente se evalúa la compatibilidad de la arena con las escorias de horno de arco eléctrico, así como con la emulsión bituminosa empleada.

4.1.5. Fibras de celulosa de la industria papelera

Las fibras de celulosa son actualmente un desecho sin uso producido por la industria de fabricación del cartón.

Estas fibras se forman en el proceso de producción de papel de embalaje a partir de papel reciclado. El papel reciclado es triturado con agua para poner las fibras en suspensión, sometándose posteriormente a una separación física con diferentes tamices. Finalmente se realiza una separación ciclónica. Los desechos de esta separación ciclónica se transfieren a una prensa para eliminar parte del agua que contiene el residuo. Este residuo, tras su prensado, es el que se utiliza en esta investigación y se denomina fibra de celulosa desechada por la industria papelera.

Las fibras de celulosa detallada son el aditivo que se ha incorporado a la mezcla bituminosa para la retención en la mezcla de un mayor porcentaje de betún. Estas fibras se han tomado de la industria productora y se han sometido a un proceso de adaptación para su uso en mezclas bituminosas. Este proceso consiste en un lavado con una disolución de hidróxido de sodio al 30 %. Este pretratamiento se realiza con un doble objetivo; por una parte, se paralizan las reacciones orgánicas que se pudieran producir; por otra parte, se eliminan las ceras naturales que pudieran estar adheridas a las fibras y que impedirían la correcta adhesión con el betún de la mezcla bituminosa. Una vez

realizado este pretratamiento, se trituran para conseguir un tamaño de fibra lo más reducido posible, haciendo posible la homogenización de las mismas durante el proceso de mezclado en la mezcla bituminosa.

4.1.6. *Árido coreano*

El árido corneado es un árido habitualmente utilizado en carreteras de tráfico importante debido principalmente a sus excelentes características resistentes. Este árido procede al igual que los demás materiales de la zona de Andalucía, España.

Las rocas corneanas son un tipo de rocas metamórficas de contacto, muy duras y con gran resistencia a los ciclos de hielo y deshielo. Contiene en gran proporción cuarzo, grafito, biotita, óxido de hierro o feldespatos, por lo que se puede considerar una roca silícea de calidad.

La extracción en canteras de este material, al ser una roca dura, consume gran cantidad de explosivos, ya que su resistencia a la fragmentación es alta. Además, su composición silícea hace que los equipos de tratamiento y procesado se desgaten con frecuencia, en comparación con una roca caliza.

Es por lo tanto un árido de excelente calidad, en el cual se emiten importantes emisiones de gases de efecto invernadero en su extracción y con el que se va a comparar las escorias de horno de arco eléctrico. Por lo tanto, su función dentro de las mezclas bituminosas conformadas es la de árido grueso y fino. Para ello, al igual que se realizó con las escorias, el árido es recibido de la cantera y lavado para, posteriormente, ser tamizado por diferentes tamices que puedan conformar la curva granulométrica seleccionada.

4.1.7. *Filler calizo*

Los problemas derivados de la falta de adhesión entre los áridos silíceos y el betún hacen que sea habitual el empleo de filler de aportación de naturaleza caliza. Los áridos calizos poseen mucha menor resistencia que los silíceos, así como una menor resistencia a la abrasión provocada por el neumático. Por lo tanto, su empleo en carreteras de tráfico importante no es usual ni recomendable.

No obstante, su empleo como filler inerte hace posible la formación de un mastic de calidad aceptable que recubre los áridos silíceos y forma una estructura capaz de soportar las cargas del tráfico. Por ello, la función del filler calizo en la presente investigación es la de comparar las propiedades de las mezclas bituminosas conformadas con él, con las de las mezclas conformadas con escorias de horno cuchara.

El filler calizo suministrado por la empresa productora poseía un tamaño de partícula muy fino, no siendo necesario su tamizado. Este filler fue secado a 105 ± 2 °C durante 24 horas para evitar la existencia de agua durante la conformación de las mezclas bituminosas.

4.1.8. Emulsión bituminosa C60B5 REC

Esta emulsión se utilizó para los firmes reciclados in situ con escorias de horno cuchara. La emulsión bituminosa en esta mezcla juega un papel fundamental para la obtención de las características mecánicas y de durabilidad necesarias. Es el elemento encargado de proporcionar la resistencia a tracción de la mezcla bituminosa, así como la durabilidad en el tiempo. Cabe destacar que una emulsión bituminosa es por definición una dispersión coloidal de glóbulos de betún en agua, gracias a la función de un emulgente.

La elección de la emulsión adecuada es imprescindible por diversos motivos, entre ellos que se produzca una adhesividad adecuada del árido con el betún, así como unos tiempos de rotura y envuelta adecuados a su ejecución en obra. Para la consecución de estos factores en mezclas bituminosas con elevado porcentaje de árido fino se hace necesaria la utilización de emulsión bituminosa de rotura lenta tal que, su tiempo de rotura más largo, haga proclive la envuelta de las partículas. Por otra parte, y con el fin de la consecución de una compatibilidad química entre el árido, firme fresado y escoria de horno cuchara, se optó por una emulsión catiónica de características adecuadas a la naturaleza de la escoria y sin ocasionar problemas en la envuelta con el firme fresado. El nombre de la emulsión según la normativa europea es C60B5 REC, las características técnicas de esta emulsión se detallan en la Tabla 4.1.

Characteristics	Unit	Standard	Min.	Max.
Original Emulsion				
Particle polarity	-	UNE EN 1430	Positive	
Breaking value	g	UNE EN 13075-1	170	
Binder content (per water content)	%	UNE EN 12846-1	58	62
Efflux time (2 mm, 40 °C)	s	UNE EN 12,846	15	70
Residue on sieving (0.5 mm)	%	UNE EN 1429	-	0.10
Setting tendency (7 days storage)	%	UNE EN 12,847	-	10
Water effect of binder adhesion	%	UNE EN 13,614	90	-
Binder after Distillation (UNE EN 1431)				
Penetration (25 °C; 100 g; 5 s)	0.1mm	UNE EN 1426	-	270
Softening point	°C	UNE EN 1427	35	-
Evaporation Residue (UNE EN 13074-1)				
Penetration (25 °C; 100 g; 5 s)	0.1mm	UNE EN 1426	-	330
Softening point	°C	UNE EN 1427	35	-
Stabilizing Residue (UNE EN 13074-2)				
Penetration (25 °C; 100 g; 5 s)	0.1mm	UNE EN 1426	-	270
Softening point	°C	UNE EN 1427	35	-

Tabla 4.1. Ficha técnica de la emulsión bituminosa C60B5 REC.

4.1.9. Emulsión bituminosa C60B4 MIC

La emulsión bituminosa empleada para el tratamiento superficial con escorias de horno de arco eléctrico es la denominada según la normativa europea como C60B4 MIC. Es una emulsión usada tradicionalmente y en la actualidad para tratamientos superficiales, de naturaleza catiónica y tiempos de rotura lentos. La naturaleza catiónica la hace adecuada para que se produzca la rotura de la emulsión en contacto con el árido silíceo, por lo que es descartado el empleo de emulsiones de naturaleza aniónica, más compatibles con otros áridos como los calizos. El tiempo de rotura lento condiciona el tiempo adecuado para la envuelta de todos los áridos, finos y grueso, y la adhesión correcta con los mismos. Tiempos de rotura más cortos, como medios o rápidos, provocarían una envuelta incorrecta del árido. Las características técnicas de la emulsión bituminosa se detallan en la Tabla 4.2.

Characteristics	Unit	Standard	Min.	Max.
Original Emulsion				
Particle polarity	-	UNE EN 1430	Positive	
Breaking value (Forshammer filler)	-	UNE EN 13075-1	110	195
Efflux time (2 mm, 40 °C)	s	UNE EN 12846	15	70
Binder content (per water content)	%	UNE EN 1428	58	62
Residue on sieving (0.5 mm)	%	UNE EN 1429	-	0.10
Setting tendency (7 days storage)	%	UNE EN 12847	-	10
Water effect of binder adhesion	%	UNE EN 13614	90	-
Binder after distillation (UNE EN 1431)				
Penetration (25 °C; 100 g; 5 s)	0.1 mm	UNE EN 1426	-	100
Softening point	°C	UNE EN 1427	43	-
Evaporation residue (UNE EN 13074-1)				
Penetration (25 °C; 100 g; 5 s)	0.1 mm	UNE EN 1426	-	100
Softening point	°C	UNE EN 1427	43	-
Stabilizing residue (UNE EN 13074-2)				
Penetration (25 °C; 100 g; 5 s)	0.1 mm	UNE EN 1426	-	100
Softening point	°C	UNE EN 1427	43	-

Tabla 4.2. Ficha técnica de la Emulsión Bituminosa C60B4 MIC.

4.1.10. Emulsión bituminosa C60BF3 MBA

La emulsión bituminosa empleada para el conformado de asfalto poroso con escorias de horno de arco eléctrico es una emulsión comercial C60BF3 MBA. Esta emulsión es apropiada para las mezclas de granulometría discontinua, siendo su naturaleza catiónica y su tiempo de rotura medio. La elección de este tipo de emulsión viene motivada por dos razones fundamentales; por un lado, la granulometría de la mezcla final la hace adecuada para la envuelta de los áridos en el tiempo de rotura estipulado; y por otro lado, la naturaleza química de la emulsión es adecuada para que se produzca la rotura en contacto con la escoria de horno de arco eléctrico y proporcione la adhesión correcta. Por lo tanto, se he descartado totalmente el empleo de emulsiones de naturaleza aniónica, por incompatibilidad con las escorias, así como la utilización de emulsiones con otros tiempos de rotura, rápido o lento, por no ser adecuadas a la curva granulométrica de la mezcla.

En la Tabla 4.3 se detalla la ficha técnica de la emulsión C60BF3 MBA utilizada.

Characteristics	Unit	Standard	Min.	Max.
Original Emulsion				
Particle polarity	-	UNE EN 1430	Positive	-
Breaking value (Forshammer filler)	g	UNE EN 13075-1	70	155
Binder content (per water content)	%	UNE EN 12846-1	58	62
Oil distillate content	%	UNE EN 1431	-	5
Efflux time (2 mm, 40 °C)	s	UNE EN 12846	40	130
Residue on sieving (0.5 mm)	%	UNE EN 1429	-	0.10
Setting tendency (7 days storage)	%	UNE EN 12847	-	5
Water effect of binder adhesion	%	UNE EN 13614	90	-
Binder after distillation (UNE EN 1431)				
Penetration (25 °C; 100 g; 5 s)	0.1 mm	UNE EN 1426	-	220
Softening point	°C	UNE EN 1427	35	-
Evaporation residue (UNE EN 13074-1)				
Penetration (25 °C; 100 g; 5 s)	0.1 mm	UNE EN 1426	-	330
Softening point	°C	UNE EN 1427	35	-
Stabilizing residue (UNE EN 13074-2)				
Penetration (25 °C; 100 g; 5 s)	0.1 mm	UNE EN 1426	-	220
Softening point	°C	UNE EN 1427	35	-

Tabla 4.3. Ficha técnica de la emulsión bituminosa C60BF3 MBA.

4.1.11. Betún 50/70

El betún utilizado para el conformado de las mezclas bituminosas SMA con escorias de horno de arco eléctrico y escorias de horno cuchara es un betún denominado 50/70 por la normativa europea, siendo ambos números el índice de penetración en el cual oscila. Este betún de penetración dura es usualmente empleado en las regiones españolas debido a los climas cálidos existentes. Cabe destacar que es un betún comercial sin aditivos.

La ficha técnica del betún se puede observar en la Tabla 4.4.

Characteristics	Unit	Standard	Min	Max
Fresh binder				
Penetration (25°C)	0.1mm	UNE-EN 1426	50	70
Penetration index	-	UNE-EN 12591	-1.5	0.7
Softening point (R&B)	°C	UNE-EN 1427	46	54
Fraass point	°C	UNE-EN 12593	-	-8
Solubility in xylene	%	UNE-EN 12592	99.0	-
Flash point	°C	UNE-EN ISO 2592	230	-
Resistance to Hardening 163 °C (UNE-EN 12607-1)				
Mass loss	%	UNE-EN 12607-1	-	0.5
Retained penetration	%	UNE-EN 1426	50	-
Increase in softening point (R&B)	°C	UNE-EN 1427	-	11

Tabla 4.4. Ficha técnica del betún 50/70.

4.2. Metodología

La metodología seguida en la presente investigación está compuesta de una serie de ensayos lógicamente ordenados para la obtención de resultados objetivos sobre la bondad de la ejecución de mezclas bituminosas para conservación de carreteras con escorias de horno de arco eléctrico y escorias de horno cuchara. Para ello se compararon las propiedades de las mezclas bituminosas desarrolladas con la normativa vigente española e incluso con mezclas fabricadas con materiales comerciales.

Basándose en lo comentado, primeramente se analizaron los subproductos de la industria siderúrgica para conocer las propiedades físicas, composición química y características mecánicas, dependiendo de la función que cada elemento ocupe en la mezcla bituminosa. De esta forma se evaluó la aptitud de los materiales para el conformado de mezclas bituminosas. A su vez, se evaluaron materiales complementarios como las fibras de celulosa desechadas de la industria papelera o el firme reciclado fresado de pavimento deteriorado.

Posteriormente, se conformaron las diferentes mezclas bituminosas mencionadas con diversas formulaciones de combinación de materiales y diferentes porcentajes de emulsión o betún. Los grupos de muestras conformados fueron analizados con los ensayos correspondientes a la categoría de cada mezcla bituminosa, ya que como se pretende cubrir un amplio espectro de casos en los que las escorias de acería pueden

desarrollarse, cada tipo de mezcla posee unos ensayos particulares que se describen individualmente en los apartados posteriores.

Finalmente, y tras evaluar las propiedades de las diferentes mezclas, se procedió a la obtención de la combinación óptima de materiales para cada familia de muestras, estudiando las ventajas de la utilización de escorias de horno de arco eléctrico y escorias de horno cuchara. De esta forma se obtuvieron una serie de conclusiones parciales que son imprescindibles para la obtención de la conclusión final y, en consecuencia, de la valoración de la aptitud de ambos subproductos.

En los siguientes subapartados se describe de forma detallada cada una de las fases de la investigación.

4.2.1. Caracterización de las materias primas

En este apartado se describen los ensayos que se han realizado a las escorias de horno de arco eléctrico y a las escorias de horno cuchara para evaluar su aptitud para su utilización en la conformación de mezclas bituminosas. Ambos subproductos poseen una serie de características muy diferentes, por lo que cada uno de ellos emplea una función diferente en la mezcla bituminosa. Por lo tanto, los ensayos que se realizan físicos y mecánicos difieren en las escorias de horno de arco eléctrico y en las escorias de horno cuchara. No obstante, el análisis de la composición química para ambos materiales ha sido similar. A su vez, cabe destacar que para la fabricación de las diferentes mezclas se han utilizado otros subproductos industriales que aportaban características particulares o eran necesarios para la conformación de las mezclas bituminosas, entre estos subproductos se encuentran las fibras de celulosa de la industria papelera y el firme reciclado o fresado. Estos subproductos también han sido analizados y se describen en la metodología los ensayos que se han llevado a cabo para la valoración de sus propiedades.

4.2.1.1. Caracterización de las escorias de horno de arco eléctrico y las escorias de horno cuchara

En este apartado, y como se ha mencionado anteriormente, se definen y describen los ensayos que se han realizado a las escorias de horno de arco eléctrico y a

las escorias de horno cuchara, materiales fundamentales del presente documento. Los ensayos se componen de ensayos químicos, físicos y mecánicos, no obstante, no todos pueden ser realizados para los dos materiales, ya que son materiales muy diferentes y cumplen funciones distintas dentro de la mezcla bituminosa. A continuación se describen todos los ensayos realizados a ambos subproductos de la industria siderúrgica.

Cabe destacar que los residuos y los materiales comerciales se trataron como se ha detallado anteriormente para poder realizar los ensayos de caracterización física y química, así como para su utilización en los posteriores ensayos.

Primeramente, las escorias de horno de arco eléctrico y las escorias de horno cuchara fueron analizadas por análisis elemental, determinando el porcentaje de carbono, nitrógeno, hidrógeno y azufre existentes en las muestras. A su vez, las escorias fueron sometidas al ensayo de fluorescencia de rayos X, ya que son materiales inorgánicos y es esencial la determinación de su composición química.

Una vez determinada su composición química y analizada la presencia de elementos contaminantes que pudieran perjudicar a la mezcla bituminosa final, se procedió a realizar una serie de ensayos físicos a los diferentes residuos según la función que desempeñan cada uno dentro de la mezcla bituminosa.

Las escorias de horno cuchara fueron sometidas a los ensayos de densidad de las partículas (norma UNE-EN 1097-7), para la evaluación de las posibles correcciones volumétricas necesarias; densidad aparente en queroseno (norma UNE-EN 1097-3), para determinar si se tratan de materiales pulverulentos que perjudique su dosificación; e índice de plasticidad (normas UNE 103103 y UNE 103104), para evaluar la posible existencia de partículas arcillosas que pudieran crear problemas de expansividad en la mezcla final.

Las escorias de horno de arco eléctrico fueron sometidas a los ensayos de densidad de los partículas (norma UNE-EN 1097-7), para determinar si es necesaria la ejecución de correcciones volumétricas; equivalente de arena (norma UNE-EN 933-8), para evaluar el porcentaje de partículas coloidales que pudieran perjudicar la mezcla final; porcentaje de caras de fractura (norma UNE-EN 933-5) e índice de lajas (norma

UNE-EN 933-3), para la calificación del árido, ya que las escorias de horno de arco eléctrico cumplen la función dentro de la mezcla bituminosa de resistir las cargas del tráfico por el esqueleto mineral, y por lo tanto, las partículas deben tener unas formas determinadas; resistencia a la fragmentación (norma UNE-EN 1097-2), para calificar la dureza del material y su aptitud para tráficos elevados; resistencia a los ciclos de hielo y deshielo (norma UNE-EN 1367-1), para evaluar la resistencia a la fatiga térmica del árido; y determinación del coeficiente de pulimiento acelerado (norma UNE-EN 1097-8), para cuantificar la afección del árido por la fricción continua del neumático con el pavimento y, en consecuencia, su durabilidad en el tiempo.

A su vez, se evaluaron los lixiviados para cuantificar la presencia de metales pesados que podrían lixivarse de las escorias. No obstante, su envuelta con la emulsión bituminosa y, en definitiva, con el betún reduce considerablemente las concentraciones de estos elementos en la lixiviación. La norma utilizada para la lixiviación de las escorias de horno de arco eléctrico y de las escorias de horno cuchara fue la UNE-EN 12457-3:2003.

4.2.1.2. Caracterización del firme reciclado

Dentro de los subproductos utilizados en este trabajo, el firme fresado debe ser estudiado a través de sus características físicas y mecánicas, ya que este material posee una función muy importante dentro de la mezcla bituminosa conformada y, por lo tanto, debe ser correctamente caracterizado para determinar los puntos críticos del mismo. Primeramente se procedió a la separación del ligante, el árido grueso y el árido fino según la norma UNE-EN 12697-1. El ligante envejecido fue estudiado a través del ensayo de penetración UNE-EN 1426 y punto de reblandecimiento UNE-EN 1427, para evaluar el punto de envejecimiento del mismo. Por otra parte, el árido grueso del firme fresado es el encargado de proporcionar el esqueleto mineral a la mezcla, por lo que son obligados los ensayos resistencia a la fragmentación UNE-EN 1097-2, porcentaje de caras de fractura UNE-EN 933-5 e índice de lajas UNE-EN 933-3. El árido fino es sometido a los ensayos de equivalente de arena UNE-EN 933-8 e índice de Plasticidad (UNE 103103 y UNE 103104) para calificar la presencia de elementos arcillosos que puedan llegar a perjudicar la mezcla.

Con esta serie de ensayos el firme reciclado es evaluado y calificado para su utilización en nuevas mezclas con emulsión bituminosa in situ.

4.2.1.3. Caracterización de las fibras de celulosa

Las fibras de celulosa fueron sometidas al tratamiento detallado anteriormente, eliminando cualquier reacción orgánica posible y obteniendo un tamaño milimétrico de fibra excelente para su correcta mezcla homogénea.

Las fibras, tras el proceso, fueron secadas para la eliminación del agua y sometidas a una serie de ensayos. El primero de estos ensayos fue el de análisis elemental, ya que al ser un material orgánico principalmente, debe conocerse si existen elementos como el azufre o el nitrógeno que pudieran perjudicar a la mezcla final.

A su vez, las fibras de celulosa de la industria papelera fueron evaluadas con el microscopio electrónico de barrido con diferentes ampliaciones y tras su metalización con carbono. De esta forma se pudo observar el tamaño de las fibras obtenidas tras el pretratamiento, así como la existencia de aglomeraciones que pudieran perjudicar la distribución homogénea de las fibras en la mezcla bituminosa.

Con estos ensayos se puede evaluar objetivamente la calidad de las fibras obtenidas, así como la existencia de ciertos parámetros críticos que debieran vigilarse durante el proceso.

4.2.2. Conformado de las diferentes mezclas bituminosas con escorias de horno de arco eléctrico y escorias de horno cuchara

En este apartado de la metodología, y una vez detallados los ensayos de caracterización de los materiales iniciales, se procede a definir los cuatro tipos de mezclas bituminosas desarrollados. Estas mezclas bituminosas poseen particularidades que las hacen muy diferentes entre ellas, no obstante, en todas se intenta maximizar los aspectos positivos de las escorias de horno de arco eléctrico y de las escorias de horno cuchara.

A continuación se describe la metodología seguida para la evaluación de la calidad de la incorporación de las escorias en las mezclas bituminosas detalladas, así como las fases o ensayos esenciales que deben realizarse para la obtención de resultados objetivos y comparables.

4.2.2.1. Firmes reciclado in situ con emulsión bituminosa y escorias de horno cuchara

Este tipo de mezcla bituminosa posee importantes ventajas ambientales frente a otro tipo de técnicas. El uso de emulsión bituminosa para el conformado implica su capacidad para ejecutarse a temperatura ambiente sin tener que calentar los áridos a elevadas temperaturas, reduciendo por lo tanto la emisión de gases de efecto invernadero. Además, la ejecución de la técnica directamente sobre la infraestructura, gracias a la utilización de trenes de carretera, evita el transporte de los materiales. No obstante, la mayor ventaja que posee es el empleo de porcentajes altos del firme fresado o reciclado, hecho inadmisibles por otro tipo de técnicas. El aprovechamiento de este firme fresado, así como el empleo de escoria de horno cuchara, crea una mezcla sostenible con un porcentaje inigualable de utilización de residuos. La escoria de horno cuchara dentro de esta mezcla bituminosa cumple dos funciones principales. La primera de ellas es su adición para la corrección de la curva granulométrica del firme reciclado. Debe tenerse en cuenta que el firme fresado posee principalmente tamaños de árido grueso y en menor proporción de árido fino. Por lo tanto, la incorporación de la escoria de horno cuchara con todas sus fracciones granulométricas y tal cual viene de fábrica, corregirá esa deficiencia de partículas de menor tamaño. Por otra parte, la escoria de horno cuchara, como han referenciado diversas investigaciones, posee propiedades cementantes interesantes. Su empleo como árido de aportación al firme fresado y su posterior mezclado con el agua de preenvuelta y la emulsión bituminosa, hace posible el desarrollo de estas propiedades cementantes. Es, por lo tanto, este tipo de mezcla bituminosa la que más optimiza las propiedades de las escorias de horno cuchara.

La metodología para la evaluación de esta mezcla bituminosa comienza con el análisis de los materiales de partida y la evaluación de su aptitud para la consecución de un firme reciclado in situ con emulsión bituminosa. Posteriormente, se procede a ajustar la curva granulométrica correspondiente con la adición de las escorias blancas o de horno cuchara al firme fresado. La curva granulométrica obtenida por la combinación de ambos materiales debe ajustarse al huso granulométrico definido por la Orden Circular 8/2001, más concretamente RE2. La elección de este tipo de mezcla viene motivada por su reducido espesor de capa y por lo tanto unas características mecánicas más adecuadas.

Estudiado el porcentaje de combinación del firme fresado y de las escorias de horno cuchara se procede a estudiar los diversos porcentajes de adición de fluidos, siendo los fluidos la emulsión bituminosa y el agua de preenvuelta. Para ello, y basado en la norma NLT-389/00, se ejecuta primeramente al cálculo del Contenido Teórico de Fluidos. Este Contenido Teórico de Fluidos (CTF) corresponde al porcentaje de humedad óptima obtenido del ensayo Proctor Modificado UNE 103501 para la combinación de firme fresado y escorias blancas. A su vez, este Contenido Teórico de Fluidos (CTF) es la referencia para el porcentaje de agua de preenvuelta más el porcentaje de emulsión necesario adicionar al árido para la consecución de la densidad máxima, y aproximadamente, su mayor resistencia.

El porcentaje definitivo denominado Contenido Óptimo de Fluidos (COF) se determina realizando varios ensayos de envuelta con diferentes porcentajes de agua de preenvuelta y manteniendo fijo el porcentaje de emulsión, proporcionando a su vez, un contenido de fluidos total (agua más emulsión) comprendido entre el CTF-2 % y el CTF %. El Ensayo de Envuelta se realiza según la NLT-196/84 sin la adición de carbonato cálcico, únicamente con el material procedente de la combinación del firme reciclado y las escorias de horno cuchara, así como con la emulsión y el agua de preenvuelta estipulada. A través del ensayo de envuelta se evalúa la aptitud de la emulsión en combinación con el árido y se selecciona el porcentaje correspondiente a Contenido Óptimo de Fluidos (COF), que debe estar comprendido entre el CTF-1 % y el CTF %

Una vez determinado el Contenido Óptimo de Fluidos (COF) se procede a determinar los porcentajes de agua de preenvuelta y emulsión de las diferentes familias, sabiendo que el porcentaje de emulsión debe estar contenido entre un 2,5 % y un 4 %. Por lo tanto se realizaron varias familias con porcentajes de emulsión sobre árido (firme fresado más escorias blancas) entre el 2,5 % y el 4 %, correspondiéndole unos porcentajes de agua de preenvuelta iguales a la diferencia existente entre el Contenido Óptimo de Fluidos (COF) y los porcentajes de emulsión.

Determinada la composición de las diferentes familias se procede a la realización de las probetas, contando con un total de 12 por cada familia y fabricadas según la norma

NLT-161/98. Tras su fabricación estas probetas deben ser curadas en estufa de aire forzado a 50 ± 2 °C hasta masa constante, no inferior a tres días ni superior a siete días.

Concluido este proceso se determina la densidad máxima UNE-EN 12697-5 y densidad aparente UNE-EN 12697-6 de las probetas, así como el índice de huecos UNE-EN 12697-8 de las diferentes familias para, posteriormente, dividir cada familia en dos grupos y realizar el estudio del efecto del agua sobre la cohesión de las mezclas bituminosas compactas, inmersión – compresión NLT-162/00. El modo de operar es el de someter a un grupo de cada familia a la acción del agua para el estudio de la cohesión, para ello son sumergidas en baño de agua regulado a 49 ± 1 °C durante 4 días para, posteriormente, ensayarlas según la NLT-161/98 y evaluar la diferencia de resistencia entre las probetas sometidas a la acción del agua y las que no. Finalmente se calcula la Resistencia Conservada.

Detallada la metodología del proceso para la conformación de las diferentes probetas se procede a la explicación de los diferentes ensayos conformantes de la misma. Estos ensayos se detallan a continuación.

4.2.2.1.1. Determinación de la curva granulométrica con la combinación de escorias de horno cuchara y firme reciclado. Determinación de la granulometría de las partículas (UNE-EN 933-1:2012)

El firme reciclado fresado posee usualmente una granulometría en la cual los tamaños de áridos gruesos se encuentran en mayor proporción que los áridos finos, por lo tanto y con el objetivo de adicionar los tamaños menores, se incorporan las escorias de horno cuchara. De esta forma la curva granulométrica producida por la combinación de ambos materiales se encuentra comprendida entre el límite superior y el límite inferior del huso granulométrico del firme reciclado definido por la normativa mencionada. Además, la incorporación de las escorias de horno cuchara no solo produce la corrección granulométrica del firme fresado, ya que las propiedades cementantes de las escorias de horno cuchara (corroboradas por diversidad de autores) propicia una mezcla bituminosa de mayor resistencia. Este hecho se produce gracias a la combinación de estas escorias con el agua de preenvuelta y la emulsión bituminosa.

Por lo tanto, primeramente se calcula la curva granulométrica de las escorias de horno cuchara y del firme reciclado según la norma mencionada en este apartado para, posteriormente, determinar el porcentaje de incorporación de cada material para la obtención de la curva granulométrica final.

Debe tenerse en cuenta que en los apartados sucesivos siempre que se refiera al árido, este va a estar compuesto por el firme reciclado y las escorias de horno cuchara en los porcentajes que corresponda.

4.2.2.1.2. Ensayo Proctor Modificado (UNE 103501:1994)

Una vez definido el porcentaje de combinación del firme fresado o reciclado con las escorias de horno cuchara se procede a determinar el porcentaje de agua o humedad que debe adicionarse a la combinación de ambos áridos para la obtención de la máxima densidad seca. La densidad seca implica, en la mayoría de los materiales y a igualdad de condiciones de ensayo, una mayor resistencia del material final. Por ello, es necesario conocer el porcentaje de agua exacto a adicionar para obtener esa máxima densidad y, en consecuencia, la máxima resistencia. Para ello se conforman diferentes familias de probetas con porcentajes crecientes de agua, posteriormente se evalúa la densidad seca de las mezclas conformadas, así como la humedad real de la probeta. Los diferentes datos obtenidos de la densidad seca respecto la humedad que se adicionado antes del proceso de compactación son representados gráficamente y matemáticamente, pudiendo obtener el porcentaje de humedad que proporciona la densidad seca máxima. A esta humedad se le denomina humedad óptima.

El proceso es similar para todos los puntos de humedad, realizándose con el mismo equipamiento y la misma energía de compactación. Para realizar este ensayo primeramente se mezclaron el firme reciclado y las escorias de horno cuchara en el porcentaje determinado anteriormente. El porcentaje de combinación es aquel que permite la obtención de una curva granulométrica por la combinación de ambos materiales incluida dentro del huso granulométrico establecido en la normativa detallada anteriormente. La mezcla de ambos materiales (escorias de horno cuchara y firme reciclado) es mezclado nuevamente con el porcentaje de agua que corresponda. Esta mezcla fue vertida en 5 tongadas en el molde normalizado del Proctor Modificado,

de masa y volumen conocido. Para compactación de estas cinco tongadas se utiliza un pisón de masa y altura normalizada con el cual se aplican 60 golpes por tongada. Tras la compactación se nivela el molde, eliminando el material sobrante y anotándose el peso del molde más la muestra. Posteriormente se toma una muestra del interior del molde, que sea representativa, y se seca en estufa a una temperatura de 105 ± 2 °C durante 24 horas. Con la muestra seca se puede determinar el porcentaje de humedad real que existe en la probeta compactada y, en consecuencia, la densidad que se había obtenido en la probeta tras su compactación, ya que se conocía la masa y el volumen del molde vacío.

Este proceso se repite con diferentes muestras por cada punto de humedad y se ejecutan un total de 5 puntos de humedad. Estos resultados fueron representados gráficamente y matemáticamente con el fin de obtener el porcentaje de humedad que permite la obtención de la máxima densidad seca. Este será el porcentaje de humedad óptima que se utilizó en los posteriores ensayos y que se denomina Contenido Teórico de Fluidos.

4.2.2.1.3. Envuelta y resistencia al desplazamiento por agua de las emulsiones bituminosas (NLT-196/84)

El ensayo anterior permite determinar el porcentaje de agua óptimo que debe adicionarse para la obtención de la máxima densidad seca y, en consecuencia, la máxima resistencia. No obstante, este porcentaje de agua en los firmes reciclado con emulsión bituminosa está compuesto por el agua de preenvuelta y por el agua de emulsión. Por lo tanto, no solo influye el porcentaje de agua para obtener la máxima resistencia sino que también afecta la compatibilidad de la emulsión bituminosa con el árido (escorias de horno cuchara y firme reciclado). Por ello, debe evaluarse partiendo de la humedad óptima cual es el porcentaje más adecuado de emulsión y agua para que se produzca una cubrición correcta de los áridos, este será el Contenido Óptimo de Fluidos. Este Contenido Óptimo de Fluidos varía desde el Contenido Teórico de Fluidos o humedad óptima, hasta dos puntos porcentuales inferiores. Para determinar el Contenido Óptimo de Fluidos se realiza el presente ensayo de envuelta. Este ensayo no solo determina este parámetro esencial sino que muestra la compatibilidad del árido con la emulsión bituminosa y, en definitiva, el comportamiento que va a poseer la mezcla.

Para la realización de este ensayo se toma la combinación de firme reciclado y escorias blancas en el porcentaje detallado anteriormente. Esta mezcla de áridos es adicionada con un porcentaje fijo de emulsión y un porcentaje de agua variable entre los márgenes que se han detallado anteriormente del Contenido Teórico de Fluidos. La realización del ensayo se basa en la adición a 432 g de árido (escoria de horno cuchara y firme reciclado) el porcentaje de agua de preenvuelta. Esta mezcla es agitada hasta la homogenización de la misma y es adicionada con el porcentaje de emulsión fijado. Nuevamente es mezclada hasta que se produzca la rotura de la emulsión. Este proceso se repite con los diferentes porcentajes de agua de preenvuelta establecidos y el porcentaje de emulsión fijado, teniendo en cuenta que la suma de ambos materiales debe suponer un porcentaje comprendido entre Contenido Teórico de Fluidos y dos puntos porcentuales por debajo del mismo.

Las muestras se extienden en un papel de filtro y se dejan secar a temperatura ambiente para posteriormente evaluar la cubrición del árido. En base a la combinación de porcentajes que proporcione la mejor cubrición se selecciona este porcentaje como Contenido Óptimo de Fluidos.

Cabe destacar que para que una cubrición se califique como buena, la emulsión debe cubrir completamente los áridos, exceptuando las aristas vivas o poros. Si por el contrario hubiera una parte descubierta del árido por la emulsión pero la emulsión cubre la mayoría de los áridos, la cubrición sería calificada como aceptable, así como si hubiera una mayor parte del árido sin cubrir por la emulsión que cubierto, la cubrición sería calificada como deficiente.

4.2.2.1.4. Conformado de las diferentes familias de mezclas bituminosas. Resistencia a compresión simple de mezclas bituminosas (NLT-161/98)

Evaluated el Contenido Óptimo de Fluidos según el ensayo de envuelta y fijado el porcentaje de combinación del firme reciclado y las escorias de horno cuchara, se procede al conformado de las diferentes familias de probetas con porcentajes crecientes de emulsión. Debe tenerse en cuenta que el porcentaje de emulsión según la normativa referenciada varía desde un 2,5 % a un 4 %, por lo que se realizaron diferentes familias de probetas con porcentajes de emulsión comprendidos en el rango detallado. A su vez,

el porcentaje de agua de preenvuelta correspondiente a cada familia es la diferencia del porcentaje del Contenido Óptimo de Fluidos y el porcentaje de emulsión adicionado. Cabe destacar que de cada familia se realizaron un total de doce probetas para los ensayos posteriores.

El proceso de fabricación de las probetas es similar para todas las familias y esta detallado en la norma que titula el presente apartado. Para la ejecución de las probetas se prepara el material suficiente de escorias de horno cuchara y firmes reciclados para la fabricación de una probeta, cada probeta se realiza de forma individual por lo que el proceso debe repetirse tantas veces como probetas se desean obtener. La mezcla de ambos materiales es adicionada con el agua preenvuelta determinado según la familia a la cual corresponda, mezclando enérgicamente hasta producir una homogenización de materiales. Posteriormente se añade la emulsión bituminosa y se repite el mezclado hasta la homogenización. La mezcla obtenida es vertida en dos capas en los moldes normalizados para tal ensayo. Estas capas deben de ser penetradas 25 veces por una espátula adecuada para provocar el asentamiento del mineral y evitar segregaciones. Posteriormente se procede a la compactación de la probeta tras situar en el interior del molde el pisón necesario para aplicar la tensión de compactación. El proceso de compactación consiste en la aplicación sobre el pisón de una tensión primaria de 1 MPa para asentar la muestra, posteriormente y en el tiempo de 2 a 3 minutos con velocidad uniforme, se aplica una tensión de 21 MPa. Esta tensión se mantiene sobre la probeta durante 2 minutos. Finalmente la carga es retirada y se extrae el molde con la probeta compactada. Este proceso se repite para las doce probetas de cada familia y obviamente para todas las familias.

Cabe destacar que la emulsión bituminosa está compuesta de agua y betún principalmente, por lo que el betún cuando es mezclado con el árido rompe la emulsión y se adhiere a los áridos. El agua queda libre para que se pueda evaporar en la infraestructura por simple exposición al ambiente. Por lo tanto, las probetas conformadas deben eliminar el agua de emulsión en un proceso de curado adecuado. Para ello, las probetas son curadas en estufa de aire forzado tras su fabricación a la temperatura de 50 ± 2 °C hasta masa constante, no pudiendo estar un tiempo inferior a 3 días ni superior a 7 días.

4.2.2.1.5. Determinación de la densidad máxima (UNE-EN 12697-5:2020)

Una vez fabricadas y curadas las probetas de las diferentes familias de mezclas fabricadas con firme reciclado, escorias de horno cuchara, emulsión bituminosa y agua, se procede a determinar una serie de propiedades físicas de cada mezcla que aportan una información esencial sobre la influencia del porcentaje de emulsión.

La determinación de la densidad máxima o densidad sin huecos es un parámetro esencial para posteriores parámetros volumétricos como el índice de huecos y que, por lo tanto, influye notablemente en las características de la mezcla final. Este ensayo para la determinación de la densidad máxima se realizó para las 12 probetas de cada familia y para todas las familias, obteniendo datos suficientes para determinar con veracidad las propiedades físicas.

El ensayo de determinación de la densidad se realizó según la norma detallada y según el procedimiento hidrostático definido en ella. Para la determinación de este parámetro primeramente se mide la masa de la probeta en aire y tras su curado cuando este atemperada. Posteriormente se sumerge en agua a una temperatura de entre 20 y 30 °C durante al menos 30 minutos, pesando la probeta sumergida en agua gracias a la utilización de una balanza hidrostática. Con ambas masas de la probeta, sumergida y en aire, así como con la densidad del agua, se determina la densidad máxima según la fórmula (4.1.).

$$\text{Densidad máxima} = \frac{m_1}{m_1 - m_2} * \rho_w$$

Fórmula 4.1. Fórmula Densidad máxima.

Donde:

- m_1 es la masa de la probeta en aire y tras su curado en estufa
- m_2 es la masa de la probeta sumergida en agua
- ρ_w es la densidad del agua a la temperatura de ensayo.

4.2.2.1.6. Determinación de la densidad aparente (UNE-EN 12697-6:2012)

La determinación de la densidad aparente al igual que la densidad máxima es un parámetro fundamental para evaluar las propiedades físicas de la mezcla bituminosa obtenida y, por lo tanto, establecer la influencia de la emulsión bituminosa en las mezclas. La determinación de la densidad aparente se realizó a todas las probetas de cada familia y a las diversas familias conformadas, obviamente tras el curado de las mismas. El método utilizado dentro de la norma referenciada para el cálculo de la densidad aparente es el método hidrostático. Este método consiste en la medición de la masa de la probeta en aire y la inmersión posteriormente en agua por un tiempo no inferior a 30 minutos. Transcurrido este tiempo se mide la masa de la probeta sumergida gracias a la utilización de la balanza hidrostática. Posteriormente la probeta es extraída y secada superficialmente con algún trapo o papel que no deje restos en la misma. La masa con la superficie saturada seca se pesa en ambiente. Con las tres masas medidas de las probetas durante el proceso, así como con la densidad del agua conocida, se calcula la densidad aparente a través de la ecuación (4.2.)

$$\text{Densidad aparente} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} * \rho_w$$

Fórmula 4.2. Fórmula Densidad aparente.

Donde:

- m_1 es la masa de la probeta en aire y tras su curado en estufa
- m_2 es la masa de la probeta sumergida en agua
- m_3 es la masa de la probeta con la superficie saturada seca
- ρ_w es la densidad del agua a la temperatura de ensayo.

La densidad aparente es obviamente inferior a la densidad máxima, ya que esta última no tiene en cuenta los huecos en mezcla.

4.2.2.1.7. Determinación del contenido de huecos (UNE-EN 12697-8:2020)

El contenido de huecos de aire en la mezcla bituminosa es una de las propiedades físicas que mayor influencia posee en las características finales de la mezcla bituminosa. Este contenido de huecos en mezcla influye notablemente en la resistencia mecánica de

la mezcla bituminosa conformada, así como en otros parámetros como la capacidad drenante de la mezcla o incluso la absorción del ruido. Por ello su determinación a partir de la densidad aparente y la densidad máxima es esencial para evaluar la influencia de la adición de un mayor porcentaje de emulsión en la mezcla bituminosa. Su determinación a partir de los parámetros anteriormente comentados se realiza con la ecuación (4.3.)

$$\text{Contenido de huecos} = \frac{\rho_m - \rho_a}{\rho_m} * 100$$

Fórmula 4.3. Fórmula contenido en hueco.

Donde:

- ρ_m es la densidad máxima de la mezcla bituminosa.
- ρ_a es la densidad aparente de la mezcla bituminosa.

4.2.2.1.8. Ensayo de Inmersión – Compresión (NLT-162/00)

Este ensayo se realiza para evaluar la resistencia de las mezclas conformadas y la pérdida de cohesión que se produce por el efecto del agua, por lo que valora nuevamente la compatibilidad del porcentaje de emulsión con los áridos, en este caso escorias de horno cuchara y firmes reciclados. Su realización está contemplada por la normativa y se fijan una serie de límites de resistencia que deben ser superados por las probetas con y sin inmersión en agua. Cuantificándose la pérdida de resistencia de las probetas que han sido sometidas a su inmersión en agua con respecto a las que no se les ha realizado este proceso.

Para ello, las probetas de cada familia tras la determinación de la densidad máxima, la densidad aparente y el contenido de huecos son separadas en dos grupos de 6 probetas de forma aleatoria.

Uno de los grupos de 6 probetas de cada familia se introducen en estufa durante 4 días a la temperatura de 25 ± 1 °C, posteriormente se extraen de la estufa y se sumergen en agua en un baño regulado a la temperatura de 25 ± 1 °C durante 2 horas. Finalmente se ensayan y se registran sus resultados de resistencia.

Por otra parte, el otro grupo de 6 probetas de cada familia se sumergen en un baño de agua a una temperatura de $49 \pm 1^{\circ}\text{C}$ durante 4 días. Terminado este proceso se extraen del baño y se mantienen a temperatura ambiente durante dos horas para finalmente ensayarlas.

El ensayo de resistencia a compresión simple para todas las probetas, independientemente de si han sido sumergidas en agua o no, es similar. La probeta se sitúa en la prensa sin ningún tipo de confinamiento y se aplica una carga a velocidad constante de 5,08 mm/min. El registro gráfico de los datos y su interpretación matemática permite obtener la máxima carga que ha soportado la probeta ensayada, por lo que el cálculo de la resistencia máxima es inmediato.

Ensayadas todas las probetas con inmersión y sin inmersión se obtienen los valores medios de las resistencias máximas de cada grupo, así como el error cometido. Con estos valores medios de cada grupo de probetas se determina el Índice de Resistencia Conservada como indica la ecuación (4.4.)

$$\text{Índice de Resistencia Conservada} = \frac{R_2}{R_1} * 100$$

Fórmula 4.4. Fórmula resistencia conservada.

Donde:

- R_1 es la resistencia máxima a compresión simple de las probetas sin inmersión en agua.
- R_2 es la resistencia máxima a compresión simple de las probetas con inmersión en agua.

Este proceso se repite para todas las familias de probetas conformadas con porcentajes crecientes de emulsión bituminosa, calculando la resistencia máxima a compresión simple con inmersión, sin inmersión y el índice de resistencia conservada de cada familia.

4.2.2.1.9. Fórmula óptima de trabajo

Una vez obtenidos los resultados correspondientes a densidades, índice de huecos, resistencia en seco, resistencia tras inmersión y resistencia conservada para las

diferentes familias, se evalúan los resultados matemáticamente y gráficamente. De esta forma puede obtenerse el máximo de resistencia en seco y tras inmersión teniendo en cuenta que sea superior a lo delimitado por la Orden Circular 8/2001, que establece un valor mínimo de resistencia en seco de 3 MPa y tras inmersión de 2,5 MPa. Una vez obtenido el máximo y calculados por correlación matemática los valores esperados de resistencia, se procede a realizar la familia de probetas con la fórmula óptima de trabajo para, de esta forma, corroborar los valores aproximados. Esta sería en definitiva y tras la corroboración de la resistencia, la combinación ideal de firme fresado, escorias blancas, emulsión y agua para fabricar el firme reciclado in situ.

4.2.2.2. Asfalto poroso con emulsión bituminosa, escorias de horno de arco eléctrico y fibras de celulosa desechadas de la industria papelera

Este tipo de mezcla bituminosa se desarrolló con el motivo fundamental de obtener un tipo de mezcla sostenible, con gran uso de residuos, de bajo coste y de características mecánicas superiores, gracias al aprovechamiento de las propiedades de los residuos utilizados. Las escorias de horno de arco eléctrico poseen, como se ha comentado, unas formas muy adecuadas para soportar las cargas importantes del tráfico, ya que sus partículas contienen multitud de aristas vivas, no existen lajas y poseen diversas caras de fractura. A su vez, la resistencia a la fragmentación o a los ciclos de hielo y deshielo, las hacen totalmente adecuadas para trabajar en granulometrías discontinuas en las que el árido por su rozamiento interno es el que soporta las cargas de compresión. Es por lo tanto este tipo de mezcla, fabricada con emulsión bituminosa para reducir las emisiones de CO₂, el mejor tipo de material para aprovechar las excelentes cualidades de las escorias de horno de arco eléctrico. No obstante, este tipo de mezclas fabricadas con emulsión poseen poca capacidad para soportar las cargas de tracción del tráfico, produciéndose fisuras e incluso arranque de áridos. Además, los periodos de baja temperatura pueden hacer colapsar la mezcla por congelación del agua contenida en el interior de su multitud de huecos. Por ello, y para solucionar este problema, se planteó la incorporación de un porcentaje superior de betún, y en consecuencia de emulsión bituminosa. Este mayor porcentaje de betún no puede ser adicionado sino existe una absorción del mismo, ya que de lo contrario produciría

exudaciones y deformaciones plásticas importantes. Para evitar este problema, se introdujeron fibras de celulosa desechadas de la industria papelera para absorber un mayor porcentaje de betún y formar, junto con el árido fino y filler, un mastic capaz de soportar las cargas del tráfico.

Para ello, y tras analizar la aptitud química, física y mecánica de las escorias, así como de las fibras, se procede a formular la mezcla bituminosa utilizada y denominada como mezcla de granulometría discontinua, en adelante AF12. Destacar que la normativa española al respecto sobre este tipo de mezclas bituminosas esta derogada, no obstante, y siendo el ámbito de aplicación del presente estudio fundamentalmente investigador, es más que válida para la corroboración de la aptitud de la mezcla. Aparte de los valores de la normativa del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para carreteras del año 76, en el presente trabajo se utilizará la guía de buenas prácticas proporcionada por la Asociación Técnica de Emulsiones Bituminosas (en adelante ATEB), guía redactada por expertos en la materia y que marca los pasos necesarios para la evaluación de la aptitud de una mezcla de este tipo.

La curva granulometría de las escorias negras de acería será la establecida por el huso granulométrico detallado en la normativa mencionada. Esta curva granulométrica posee una composición intermedia entre el huso superior e inferior para el árido grueso. Por otra parte, y con el fin de mejorar la vida útil de la mezcla y la resistencia a tracción así como hacer posible la absorción de porcentajes crecientes de betún, se aumentó levemente la proporción de árido fino con respecto a la curva intermedia comprendida entre el huso granulométrico superior e inferior. El huso granulométrico para esta mezcla de granulometría discontinua de tamaño máximo de árido de 12 mm viene detallado en la normativa española, como se mencionó en la metodología. La curva granulométrica de las escorias negras se detalla a continuación en la Tabla 4.5. y en la Figura 4.1.

CURVA GRANULOMÉTRICA AF12

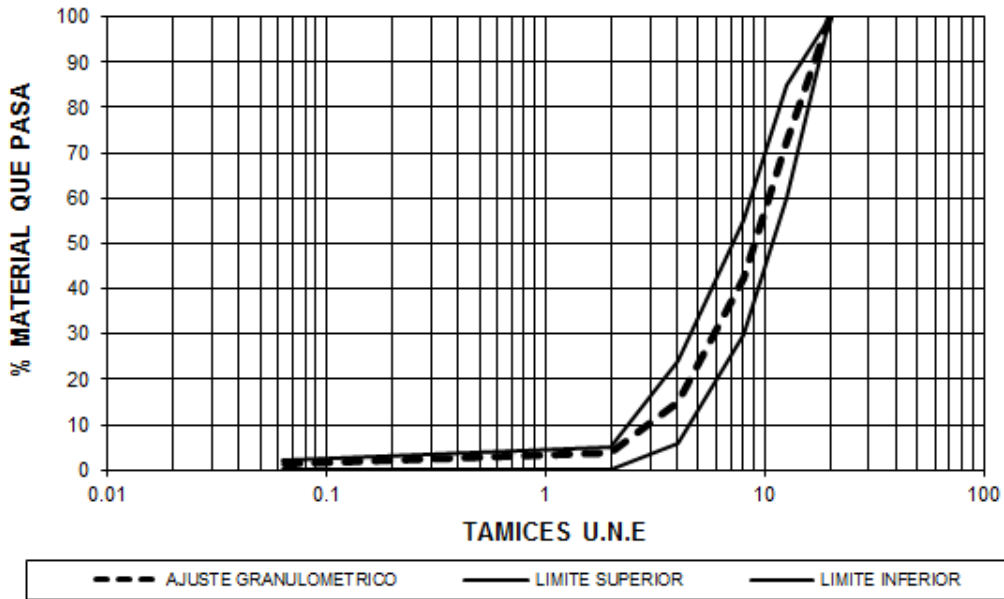


Figura 4.1. Gráfico de la curva granulométrica de las escorias negras referidas al huso granulométrico establecido por la normativa.

EAFS	100,0	72,5	42,5	15,0	4,0	1,5
Lim.sup	100	85	55	24	5	2
Lim.inf	100	60	30	6	0	0
Tamices	20	12,5	8	4	2	0,063

Tabla 4.5. Curva granulométrica de las escorias negras referidas al huso granulométrico establecido por la normativa.

Definida la curva granulométrica debe realizarse el análisis de compatibilidad del árido con la emulsión a utilizar. Para ello se realiza el ensayo de adhesividad según la norma UNE-EN 13614. Este ensayo evalúa la calidad de envuelta del árido por parte de la emulsión, y en consecuencia, la calidad de la mezcla final que va a desarrollarse.

Primeramente se realizaron mezclas AF12 con escorias negras de acería y sin la incorporación de las fibras, con el fin de determinar el punto de inicio de la utilización de las mezclas con fibras de celulosa como aquel que produce el escurrimiento de ligante en la mezcla que no las contiene. Para ello se calculó el porcentaje de emulsión a adicionar a la mezcla bituminosa según la fórmula matemática descrita por ATEB en su guía de buenas prácticas. Esta fórmula (4.5.) se basa en la superficie específica de un árido convencional y se detalla a continuación.

$$BR = (K / 100) \cdot (1.5 A + 2.5 B + 4 C + 6 D + 9 E + 12 F)$$

Fórmula 4.5. Fórmula para determinar la proporción de betún residual

Siendo:

- BR = Proporción de betún residual sobre la masa seca de los áridos.
- K = Coeficiente de riqueza, cuyo valor es 1 en capas de rodadura y 0.9 en capas inferiores.
- A = Proporción de áridos retenida por el tamiz UNE 20 mm.
- B = Proporción de áridos que pasa por el tamiz UNE 20 mm y es retenida por el tamiz UNE 8 mm.
- C = Proporción de áridos que pasa por el tamiz UNE 8 mm y es retenida por el tamiz UNE 4 mm.
- D = Proporción de áridos que pasa por el tamiz UNE 4 mm y es retenida por el tamiz UNE 2 mm.
- E = Proporción de áridos que pasa por el tamiz UNE 2 mm y es retenida por el tamiz UNE 0,063 mm.
- F = Proporción de áridos que pasa por el tamiz UNE 0,063 mm.

Cabe destacar que las escorias negras de acería poseen una densidad real superior al árido convencional, por lo tanto y con el fin de evitar problemas sobre su dosificación, se realizaron las oportunas correcciones volumétricas.

Calculado el punto que se considera óptimo empíricamente a través de la fórmula proporcionada por ATEB, se procedió a realizar diferentes familias de probetas con porcentajes crecientes de betún del 0,5 % en adelante. En la conformación debe tenerse en cuenta que el agua existente en la emulsión posteriormente será evaporada, por lo que los valores de referencia son el betún que tras la evaporación quedará en la mezcla bituminosa.

Las familias de probetas realizadas para el estudio del escurrimiento de ligante estaban compuestas por tres probetas de cada porcentaje de emulsión. Estas probetas fueron compactadas y realizadas según el procedimiento de ensayo descrito en la norma

UNE-EN 12697-30, obteniendo una serie de probetas tipo Marshall. Posteriormente, todas las probetas fueron sometidas a un proceso de curado para la eliminación del agua procedente de la emulsión. Para ello las probetas tipo Marshall se enrasaron con el molde para poder ser colocadas sobre tamices con una apertura menor a 2 mm. El proceso de curado posterior está compuesto por 2 días a la temperatura de 75 ± 2 °C y 5 días más a la temperatura de 90 ± 2 °C (los procesos de curado están detallados en ATEB). Durante el desarrollo del curado debe observarse continuamente si existen escurrimientos de ligante, para ello se dispone de un papel filtrante en la parte inferior de la probeta durante el proceso. La familia de probetas que provocó escurrimiento de ligante es el punto de inicio de la dosificación de la emulsión en las posteriores mezclas con fibras de celulosa.

Posteriormente, se realizó el mismo tipo de mezcla pero con la adición del 0,5% de fibras sobre árido, y con un porcentaje de betún inicial igual al que provocó escurrimiento de ligante en las familias anteriores. La elección de la curva granulométrica detallada fue mencionada anteriormente, y la adición del 0,5% de fibras viene motivadas por dos factores, uno de ellos la utilización en otros trabajos similares pero en mezclas en cliente (por ejemplo Stone Mastic Asphalt), y el otro factor, la corroboración de este porcentaje como óptimo en diversos estudios y normativas al respecto.

Los diferentes grupos de probetas fueron conformados y curados según el procedimiento descrito anteriormente, para finalmente realizar los ensayos físicos y mecánicos oportunos. El ensayo realizado para el estudio de la calidad de las mezclas bituminosas fue el ensayo de pérdida de partículas, según la norma UNE-EN 12697-17. A continuación, y con todas las familias de probetas, se procedió al estudio de las deformaciones plásticas con el ensayo Marshall, UNE-EN 12697-34.

Para completar el estudio, y estudiar la afección de las familias mencionadas ante condiciones adversas así como la adecuación de la adhesividad entre el árido y el ligante, se realizó en ensayo de pérdida de partículas tras inmersión NLT-362/92. Este procedimiento consiste en la ejecución del ensayo de pérdida de partículas UNE-EN

12697-17 con la inmersión de las probetas antes del ensayo y tras su curado en agua a $45 \pm 1^\circ\text{C}$ durante 24 horas.

Destacar que todas las probetas tenían una masa total de escorias negras equivalente a 1000 gramos de un árido convencional, ya que las escorias negras poseen una densidad mayor y tuvieron que hacerse correcciones volumétricas. Las fibras de celulosa se adicionaron después de las escorias negras y antes de la emulsión, siendo el tiempo de agitación de la mezcla igual al tiempo de rotura de la emulsión. A su vez como se ha mencionado, todas probetas fueron compactadas en el compactador de impactos con 50 golpes por cara, UNE-EN 12697-30. En todos los grupos de probetas, tras el proceso de curado, se han obtenido la densidad máxima, la densidad aparente y el índice de huecos, normas UNE-EN 12697-5, UNE-EN 12697-6 y UNE-EN 12697-8 respectivamente.

A continuación se describe el procedimiento de realización de los ensayos mencionados con mayor nivel de profundidad y con el fin de que sean reproducibles los resultados obtenidos.

4.2.2.2.1. Determinación de la adhesividad de las emulsiones bituminosas por inmersión en agua (UNE-EN 13614)

La selección de la emulsión bituminosa debe ser adecuada a las características del árido, a la granulometría y al tipo de mezcla bituminosa. Por lo tanto, es esencial evaluar la compatibilidad de la emulsión con las escorias de horno de arco eléctrico para la obtención de propiedades aceptables de las mezclas bituminosas conformadas. Dependiendo del tipo de mezcla, y fundamentalmente de la granulometría, se pueden utilizar diferentes tipos de emulsiones. Una granulometría en la cual existe una gran proporción de árido fino necesita el empleo de una emulsión que posea un tiempo de rotura lento. Este mayor tiempo de rotura proporcionará un mayor tiempo de mezclado y a su vez una mejor cubrición o envuelta de los áridos por la emulsión bituminosa. A su vez, si la intención es la realización de algún tipo de riego de adherencia, sellado, en negro, etc. el empleo de emulsiones de rotura rápida será el más adecuado, ya que no existe un árido fino que envolver o cubrir por la emulsión. Finalmente, cuando se trata principalmente de granulometrías discontinuas con baja proporción de árido fino, como

es el caso de esta mezcla, la utilización de emulsiones de rotura media es la adecuada. Con este tipo de emulsión se produce un correcto tiempo de rotura y trabajabilidad, capaz de cubrir las partículas de árido con la emulsión.

Otro de los factores esenciales que debe tenerse en cuenta en el momento de la selección de la emulsión bituminosa es la naturaleza química de la misma. Cabe destacar que emulsión rompe cuando entra en contacto con el árido, dejando por lo tanto de estar las partículas de betún en suspensión en el agua y adhiriéndose al árido. El agua queda libre para su evaporación por procesos naturales. Por lo tanto, debe elegirse adecuadamente la naturaleza química de la emulsión para que la adhesión sea adecuada, de lo contrario, se produciría un bajo efecto de envuelta del árido e incluso, podría eliminarse esta cubrición por el efecto del agua. En base a su naturaleza química existen principalmente emulsiones catiónicas y aniónicas.

En esta investigación en concreto sobre asfalto poroso con escorias de horno de arco eléctrico, se han seleccionado una emulsión catiónica de rotura media. Su denominación según la normativa europea es C60BF3 MBA. Para la comprobación de la compatibilidad entre las escorias negras y la emulsión bituminosa, se realizó el ensayo de determinación de la adhesividad de las emulsiones bituminosas por inmersión en agua.

Este ensayo se utiliza principalmente para el cálculo de la adhesión de emulsión bituminosa específica con un árido en concreto cuando es sumergida en agua. Además, este ensayo diferencia dos aspectos de la adhesividad, la adhesividad inmediata del árido con la emulsión y el efecto del agua sobre la adhesión del ligante con el árido.

Para el cálculo de la adhesividad inmediata de la emulsión con el árido se toman 100 ± 5 g de árido y 150 ± 5 g de emulsión bituminosa. Se vierten en un recipiente adecuado y se deja reposar durante 60 ± 5 s sin mezclarlo ni homogenizarlo. Posteriormente y con sumo cuidado se inclina el recipiente para verter el exceso de emulsión. La mezcla obtenida es lavada suavemente por un flujo continuo de agua hasta que esta salga limpia. Finalmente, se vierte en un vaso de precipitados y se analiza la cubrición que se ha conseguido.

Por otra parte, el ensayo de adhesión del ligante se realiza con 200 ± 5 g de árido y una masa de emulsión que propicie una masa de ligante de 10 ± 1 g. Ambos materiales son mezclados cuidadosamente hasta la rotura de la emulsión para, posteriormente, ser depositados sobre un vidrio de reloj. Si con la masa de emulsión que se ha adicionado no fuera posible la correcta cubrición del árido, se añaden porcentajes crecientes hasta que este hecho se produzca. El vidrio de reloj es introducido en estufa de aire forzado a la temperatura de 60 ± 3 °C durante 24 ± 1 horas. Este proceso se realiza con el fin de eliminar el agua de la emulsión y por lo tanto obtener el árido con el betún residual de la emulsión. Finalmente la mezcla es extraída y mezclada en un vaso de precipitados con 300 ml de agua, calentando la mezcla a 60 ± 3 °C durante 20 ± 4 horas para evaluarla la cubrición tras este periodo.

La superficie cubierta por la emulsión o por el betún residual debe graduarse según la escala que se menciona a continuación:

- 100; toda la superficie está cubierta.
- 90; aproximadamente más del 90% de la superficie está cubierta
- 75; la superficie cubierta es entre el 75% y el 90%.
- 50; la superficie cubierta es entre el 50% y el 75%.
- <50; menos del 50% de la superficie está cubierta.
- 0; el ligante se encuentra separado del agua excepto algunas ligeras marcas.

Tras la realización de este ensayo se puede obtener objetivamente la compatibilidad de la emulsión C60BF3 MBA con las escorias negras, así como del betún residual, proporcionando información cualitativa esencial para valorar las posteriores características resistentes de la mezcla.

4.2.2.2.2. Preparación de probetas mediante compactador de impactos (UNE-EN 12697-30:2019)

La norma definida se aplica para la compactación de las diferentes probetas utilizadas en esta investigación, ya sea con fibras de celulosa o sin fibras de celulosa como las primeras familias desarrolladas. Las probetas compactadas son utilizadas para

diversidad de ensayos posteriores, representado a su vez las propiedades físicas y mecánicas que se obtendrían de la mezcla en carretera tras su extensión y compactación. Es por lo tanto un método de compactación que se ha utilizado a lo largo de los años y que proporciona características muy similares a las obtenidas en obra. A su vez, los ensayos posteriores que pueden realizarse son la densidad aparente, densidad máxima, contenido de huecos en mezcla y estabilidad Marshall. Con estos resultados puede definirse con veracidad las propiedades físicas de las mezclas y su comportamiento mecánico ante las deformaciones plásticas.

La compactación se realiza tras el mezclado de los diversos materiales conformantes de la mezcla bituminosa y tras el proceso de rotura de la emulsión. La mezcla conformada se traspa al molde normalizado tipo Marshall y es compactado a través de un pisón en el cual se deja caer una masa normalizada 50 veces. Este proceso se repite en la cara inferior de la probeta, proporcionando por lo tanto la compactación de 50 golpes definida en cada una de las caras de la probeta.

Las probetas tras su proceso de compactación son deslizadas dentro del molde hasta quedar enrasadas con el borde del mismo. Estas probetas son depositadas sobre una maya metálica de orificio igual a 3 – 4 mm e introducidas en estufa de aireación forzada sobre un papel filtro de color blanco. Las probetas se mantienen en estufa durante 2 días a una temperatura de 75 ± 3 °C. Transcurrido ese tiempo se observa si se ha producido escurrimiento de ligante, sino fuera así, se vuelven a introducir las probetas en la estufa durante 5 días a la temperatura de 90 ± 3 °C. al final de este proceso se vuelve a observar que no existe escurrimiento de ligante.

Este proceso de curado de las mezclas bituminosas proporcionado por ATEB (Asociación Técnica de Emulsiones Bituminosas) permite por una parte eliminar el agua contenida en la emulsión y, por otra parte, descartar aquellas familias que poseen un porcentaje de betún en exceso, ya que puede evaluar si se produce escurrimiento de ligante. Este factor es esencial para que no se produzcan exudaciones de betún en la carretera durante su vida útil.

Como se ha comentado en el apartado anterior, las mezclas bituminosas serán conformadas con la granulometría determinada y emulsión bituminosa, sin la adición

de fibras. El porcentaje de emulsión bituminosa ira aumentándose progresivamente hasta alcanzar aquel porcentaje que produce escurrimiento de ligante. Por lo tanto, este será el porcentaje que se tome como inicial para crear la primera familia de mezclas con fibra de celulosa comprobando, de esta manera, que las fibras de celulosa retienen el betún en exceso y no crean escurrimiento de ligante.

4.2.2.2.3. Determinación de la densidad máxima (UNE-EN 12697-5:2020)

Las probetas que no han producido escurrimiento de ligante durante el proceso de curado son extraídas del molde y sometidas a los ensayos presentes para la determinación de las propiedades físicas. La densidad máxima, como se comentó en el apartado 4.2.2.1.5., es la densidad sin tener en cuenta los huecos que existen en la mezcla. En este tipo de mezcla bituminosa desarrollada se utilizó, al igual que en el apartado anterior, el método hidrostático. Por lo tanto, y al estar definido anteriormente se remite al lector al apartado mencionado para la observación de la realización del ensayo.

4.2.2.2.4. Determinación de la densidad aparente (UNE-EN 12697-6:2012)

La densidad aparente junto con la densidad máxima son las dos propiedades físicas de la mezcla bituminosa esenciales para el cálculo del índice o contenido de huecos en mezcla, parámetro esencial para este tipo de mezcla. Por lo tanto su cálculo debe ser detallado y evaluado con exactitud para determinar la influencia del mismo en los resultados. La densidad aparente, como se ha mencionado, es la densidad teniendo en cuenta el volumen que ocupan los huecos de aire.

La mezcla bituminosa posee una granulometría discontinua que proporciona directamente un elevado contenido de huecos, por lo tanto, el método hidrostático utilizado para el cálculo de la densidad aparente no puede utilizarse, ya que el agua no queda en los poros proporcionando la superficie saturada seca. Para evitar errores de cálculo en una propiedad física tan esencial, se procedió al cálculo de la densidad aparente por el método geométrico. Según este procedimiento se determinan primero las dimensiones de las probetas en milímetros y la masa seca de la probeta para,

posteriormente, calcula la densidad aparente por la ecuación (4.6.) mostrada a continuación.

$$\text{Densidad aparente} = \frac{m_1}{\frac{\pi}{4} * h * d^2} * 10^3$$

Fórmula 4.6. Fórmula Densidad aparente.

Donde:

- m_1 es la masa de la probeta en aire y tras su curado en estufa, en gramos.
- h es la altura de la probeta en milímetros.
- d es el diámetro de la probeta en milímetros.

4.2.2.2.5. Determinación del contenido de huecos (UNE-EN 12697-8:2020)

La determinación del contenido de huecos en la mezcla bituminosa desarrollada es esencial por diversos motivos. Por una parte se desea obtener un elevado índice de huecos capaz de absorber el agua de lluvia para posteriormente, y gracias a la inclinación del pavimento, retirar el agua a las cunetas. Por otra parte, se intenta conseguir una macrotextura superficial adecuada que junto con la microtextura propia de las escorias de horno arco eléctrico, proporcione la rugosidad superficial para que se produzca una excelente adherencia entre el neumático y el pavimento. De esta forma se reducen considerablemente los problemas asociados que puedan surgir por falta de adherencia del vehículo a la carretera. A su vez, un índice elevado de huecos conduce incluso a una mayor absorción del ruido por el contacto entre el neumático el pavimento, siendo esta la principal fuente de emisión de sonido en velocidades superiores a los 70 km/h.

Para el cálculo de índice de huecos se emplea la misma formulación que la detallada en el apartado 4.2.2.1.7., basándose obviamente en los valores obtenidos de densidad máxima y aparente de todas las familias de probetas desarrolladas.

4.2.2.2.6. Pérdida de partículas de probetas de mezclas bituminosas drenantes (UNE-EN 12697-17:2018)

Las mezclas de granulometría discontinua o con un elevado porcentaje de huecos tienen unas ventajas claras y objetivas sobre otro tipo de mezclas bituminosas.

Principalmente, y como se ha comentado, la capacidad para evacuar rápidamente el agua de lluvia y evitar la pérdida de seguridad para los vehículos. No obstante, esta capacidad drenante se consiguen con una granulometría discontinua, en la cual, la mayor parte del árido es árido grueso. Por lo tanto, el árido fino y el filler o polvo mineral de aportación que son los encargados de formar el mastic junto con el betún, se encuentran en baja proporción. Este hecho condiciona por una parte el elevado índice de huecos y una resistencia adecuada a las cargas de compresión del tráfico, gracias a la dureza y rozamiento interno del esqueleto mineral formado por el árido grueso; pero a su vez condiciona la existencia de un bajo porcentaje de mastic capaz de soportar las cargas de tracción del tráfico. Este condicionante se traduce en una sensibilidad de la mezcla a la fisuración e incluso a un arranque del árido grueso por el paso continuo de los vehículos. Por lo tanto y tomando como base los comentarios realizados, debe comprobarse que la mezcla bituminosa cumple unos estándares de calidad adecuado para evitar los problemas comentados, ya que si no se produjera una correcta adhesión del betún con el árido incrementaría la producción de esta problemática. Esta comprobación se realiza principalmente con el ensayo de pérdida de partículas.

El ensayo de pérdida de partículas se realiza con las probetas tipo Marshall analizadas con anterioridad de cada familia. Estas probetas se someten a una serie de volteos en la máquina de los Ángeles y con unas condiciones determinadas, midiendo la masa antes y después de ensayo y determinando, en consecuencia, la pérdida de masa. Para realizar el ensayo se anota primeramente la masa de la probeta seca y a una temperatura no superior a 25 °C. Posteriormente se introduce en la máquina de los Ángeles, sin la introducción de bolas, haciendo que el tambor gire a una velocidad comprendida entre 3,1 rad/s y 3,5 rad/s durante 300 vueltas. La probeta tras su volteo es extraída y pesada nuevamente para calcular la pérdida de partículas que ha sufrido según la ecuación (4.7.)

$$PL = 100 * \frac{(W_1 - W_2)}{W_1}$$

Fórmula 4.7. Fórmula para determinar el valor de la pérdida de partículas.

Donde:

- PL es el valor de la pérdida de partículas, expresado como un porcentaje.

- W_1 es la masa inicial de la probeta, expresada en gramos.
- W_2 es la masa final de la probeta, expresada en gramos.

Por lo tanto, con este ensayo se evalúa perfectamente la adhesión de las partículas, así como la calidad del mastic formado, ya que este es el encargado de soportar los impactos y mantener el mayor número de partículas adheridas. Supone por lo tanto un ensayo agresivo para la mezcla que refleja, concretamente en este caso, la compatibilidad de la emulsión bituminosa utilizada con el árido y en consecuencia la adhesión del betún con el mismo.

4.2.2.2.7. Efecto del agua sobre la cohesión de mezclas bituminosas de granulometría abierta (NLT-362/92)

Dada la importancia que supone la compatibilidad de la emulsión con el árido en este tipo de mezclas bituminosas y debido principalmente a su menor porcentaje de árido fino y filler, se optó por realizar el ensayo presente que evalúa el efecto del agua sobre la cohesión de la mezcla bituminosa. Esta cualidad se determina con una variación principal sobre el ensayo anterior, siendo esta la inmersión de las probetas en agua durante un tiempo determinado y a una temperatura fijada. De esta forma puede calificarse la variación de pérdidas de partículas que se ha producido en las probetas de la misma familia en seco y tras inmersión, determinando la calidad de la compatibilidad de la emulsión bituminosa con las escorias de horno de arco eléctrico.

Para la realización del ensayo, las probetas de un mismo grupo o familia tras su curado son divididas en dos subgrupos aleatoriamente. Uno de los grupos se sometió al ensayo usual que se ha mencionado con anterioridad y otro de los subgrupos a unas condiciones de inmersión. Las condiciones de inmersión consiste en sumergir las probetas durante 24 horas en un baño de agua a la temperatura de 45 ± 1 °C, seguidamente se extraen las probetas y se introducen en una estufa de aire forzado a la temperatura de 45 ± 1 °C durante otras 24 horas. Posteriormente se realiza el ensayo como se ha comentado en el anterior ensayo.

Con los valores obtenidos de los ensayos de pérdida de partículas con inmersión y sin inmersión para un mismo grupo o familia, se calcula el índice de aumento de pérdidas según la ecuación (4.8.).

$$\text{Índice de aumento de pérdidas} = 100 * \frac{PL_I}{PL_S}$$

Fórmula 4.8. Fórmula para determinar el índice de aumento de pérdidas de partículas.

Donde:

- PL_S es el valor medio del ensayo de pérdidas de partículas sin inmersión, expresado en porcentaje.
- PL_I es el valor medio del ensayo de pérdidas de partículas con inmersión, expresado en porcentaje.

Este parámetro expresado se encuentra limitado por la normativa española, no pudiendo ser la diferencia entre la pérdida de partículas en seco y tras inmersión muy elevada, ya que reflejaría la incompatibilidad de la emulsión con el árido o la ineficiencia del mastic.

Cabe destacar que el mayor porcentaje de emulsión adicionado en esta investigación se debe principalmente a la adición de fibras de celulosa desechadas de la industria papelera, por lo tanto existe un mayor porcentaje de betún que junto con el árido fino de las escorias de horno de arco eléctrico, el filler y las fibras es capaz de proporcionar un mastic de mayor calidad capaz de soportar una menor pérdida de partículas.

4.2.2.2.8. Ensayo Marshall (UNE-EN 12697-34:2013)

El mayor porcentaje de betún proporcionado por las fibras de celulosa de la industria papelera e incluido en la muestra sin aparición de problemas de escurrimiento de ligante asegura una mayor resistencia a la pérdida de partículas, ya que se forma un mastic de mayor calidad. No obstante, un mayor porcentaje de betún también puede proporcionar unas mayores deformaciones plásticas de la mezcla bituminosa con indeseables problemas de exudaciones y, en consecuencia, un comportamiento nulo de la mezcla bituminosa. Por ello, es esencial que las diferentes familias de mezclas

bituminosas conformadas con porcentajes crecientes de emulsión, betún residual, sean evaluadas para esta característica esencial.

La evaluación de las deformaciones plásticas se realiza tradicionalmente y con un nivel de seguridad totalmente demostrado con el ensayo Marshall. Este ensayo evalúa la resistencia mecánica y las deformaciones de las probetas conformadas de cada familia tras su exposición a unas temperaturas determinadas.

Para la realización de este ensayo, todas las probetas son medidas en altura, ya que posteriormente se realizaran las correcciones oportunas según este parámetro para obtener resultados objetivos y comparables. Posteriormente, se sumergen en un baño de agua durante un tiempo no inferior a 40 minutos ni superior a 60 minutos a una temperatura de 60 ± 1 °C. Una vez transcurrido este tiempo se extrae la probeta y se coloca en el útil de prensa destinado para su ensayo. Este útil detallado también habrá sido condicionado a la temperatura de la probeta para evitar la producción de gradientes térmicos y aplicará, gracias al desplazamiento de la prensa, una carga diametral en la probeta. Durante el ensayo se mide continuamente la carga aplicada así como la deformación, anotando como resultado de ensayo la carga máxima de resistencia de la probeta y el desplazamiento correspondiente a esa carga. Estos valores deben ser corregidos según diversos parámetros, siendo el principal de ellos la altura de la probeta. Los valores de carga y desplazamiento corregidos corresponden a los valores de estabilidad y deformación Marshall respectivamente.

Los resultados obtenidos pueden ser comparados con la normativa española estableciendo aquellos porcentajes de betún que obtienen condiciones rechazables. No obstante, y según la prioridad de este ensayo, así como la calidad de resultados que refleja, se toma como combinación óptima de materiales o fórmula óptima de trabajo aquel porcentaje de betún que obtiene la mayor resistencia siempre y cuando se obtenga una deformación adecuada. Las probetas conformadas con ese porcentaje de betún que desarrolla la mayor estabilidad Marshall será calificado como óptimo siempre que los resultados del ensayo de pérdida de partículas con y sin inmersión sean aceptables y se obtengan unas propiedades físicas de la mezcla adecuadas. Sino fuera así, se debe

evaluar cuál es el porcentaje que optimiza los resultados, y en consecuencia las propiedades de la mezcla bituminosa, según los ensayos mencionados.

4.2.2.2.9. Fórmula óptima de trabajo.

Con los resultados de los ensayos mencionados para los diferentes grupos de muestras se pudo observar, gráficamente y matemáticamente, la mejora producida en las familias con la adición de las fibras de celulosa. A su vez, el estudio de los modelos gráficos y matemáticos proporcionó un porcentaje óptimo de emulsión bituminosa que desarrolla las mejores características físicas y mecánicas. Esta combinación es la que se denominó como óptima y con la que se realizaron nuevamente todos los ensayos mencionados para la corroboración de las propiedades determinadas matemáticamente. Estos ensayos para la determinación de las propiedades físicas de la mezcla bituminosa final son: densidad máxima UNE-EN 12697-5, densidad aparente UNE-EN 12697-6 e índice de huecos UNE-EN 12697-8; y para las propiedades mecánicas: pérdida de partículas sin inmersión y tras inmersión UNE-EN 12697-17 y el ensayo Marshall UNE-EN 12697-34.

4.2.2.3. Tratamiento superficial para recuperación de adherencia con escorias de horno de arco eléctrico

Las escorias de horno de arco eléctrico también poseen una cualidad muy interesante que debe resaltarse, la resistencia al pulimiento. La resistencia al pulimiento es imprescindible para mezclas bituminosas que se disponen en la capa de rodadura o más superficial del pavimento. Esta resistencia al pulimiento proporciona la durabilidad de la mezcla ante el paso continuo de vehículos y, en consecuencia, ante la fricción continua del neumático con la mezcla bituminosa. Debe tenerse en cuenta que para que una carretera sea adecuada, debe ser una superficie de rodadura cómoda y segura. Esta seguridad depende de la macrotextura, debido al encaje de los áridos en la mezcla, y de la microtextura, debida a la rugosidad superficial del árido. Ambas cualidades se modifican en el tiempo y son imprescindibles de mantener, por lo que debe utilizarse en esta capa de rodadura una mezcla bituminosa con las mejores características resistentes ante el pulimiento.

Es habitual que pavimentos que no están fisurados, ni poseen deformaciones plásticas, ni se han agotado sus características estructurales, sean inseguros para los vehículos por la falta de adherencia entre el neumático y el pavimento. Esta falta de adherencia se ve incrementada enormemente en periodos de lluvia o nieve. Por lo tanto, para este tipo en concreto de infraestructuras se suele disponer de una mezcla bituminosa de reducido espesor, rápida de ejecutar y sin características estructurales, que devuelva al firme la adherencia perdida. Este tipo de mezcla son los microaglomerados en frío con emulsión bituminosa. Los microaglomerados en frío con emulsión bituminosa constan principalmente de árido grueso, en menor proporción árido fino y eventualmente filler, mezclados con agua, emulsión bituminosa (C60B4 MIC en este caso) y aditivos. Cada uno de los elementos conformantes desempeñan una función diferente, destacando la importancia del árido grueso, ya que es el elemento que debe proporcionar la resistencia al deslizamiento adecuada al pavimento, así como la resistencia suficiente para mantener esta propiedad en el tiempo. El aditivo, a su vez, se emplea como elemento para el control de la rotura, la manejabilidad y tiempo de extendido o puesto en obra. Con el fin de optimizar las propiedades resistentes de las escorias de horno de arco eléctrico y su resistencia al deslizamiento, en esta tesis se desarrollaron mezclas bituminosas tipo microaglomerados con emulsión bituminosa y escorias de horno de arco eléctrico.

Para ello, y una vez evaluada la aptitud química, física y mecánica de las escorias de horno de arco eléctrico y de la arena silíceas, se procedió a conformar la mezcla bituminosa.

La normativa utilizada para este tipo de mezcla bituminosa es la española, dada la gran profusión que ha obtenido este tipo de técnica en España y el número de éxitos que se acumulan en su fabricación. Esta normativa es la ORDEN FOM/2523/2014. En este documento se detalla un huso granulométrico para el microaglomerado en frío desarrollado, con tamaño máximo de árido de 8 mm. Este huso granulométrico es el usado en el presente estudio, estando la curva granulométrica de las escorias de horno de arco eléctrico y la arena silícea dentro del mismo. Para ello inicialmente se analizaron la granulometría de las escorias de horno de arco eléctrico y de la arena silícea. Como las escorias de horno de arco eléctrico contenían partículas con tamaños superiores a 8 mm,

estas partículas se eliminaron por tamizado dejando la distribución de partículas inferior a 8 mm inalterada. La arena silícea obviamente no contiene partículas superiores a 6 mm.

Con las curvas de ambos materiales se conformó la curva granulométrica final correspondiente a la combinación de las escorias de horno de arco eléctrico y la arena sílice. Esta curva obviamente quedaba dentro del huso granulométrico. Debe tenerse en cuenta que la función de los materiales es muy diferente, por un lado la escoria proporciona los tamaños mayores y provoca la adherencia del neumático con el pavimento. Por otro lado, la arena silícea, junto con la emulsión, será la encargada de soportar las cargas de tracción y cizalla que puedan inducirse en la infraestructura.

La normativa mencionada define unos intervalos de adición del agua de preenvuelta y de la emulsión. Estos intervalos son del 10% al 15% para el agua y del 6 al 8% para el betún. Cabe destacar que la emulsión se compone de betún, que quedará en la mezcla tras su curado, y de agua, que facilita las operaciones de conformado a temperatura ambiente y es eliminada tras la rotura de la emulsión por evaporación. Por lo tanto, el betún es el que proporciona las características mecánicas a la mezcla bituminosa. El cambio entre porcentajes de betún y de emulsión es inmediato conociendo la ficha técnica de la emulsión bituminosa (C60B4 MIC). Por otra parte, los porcentajes de emulsión, betún, agua y aditivo siempre estarán definidos en este documento como porcentajes en masa sobre la masa total de árido (escorias de horno de arco eléctrico más arena silícea).

La capacidad adhesión de la emulsión al árido se realizó con el ensayo de envuelta según la norma española NLT-196/84. Estudiada la aptitud de la emulsión bituminosa, se procedió a la fabricación de las mezclas con diferentes porcentajes de agua de preenvuelta y emulsión bituminosa. El porcentaje de agua referido en la normativa, entre un 10 % y un 15 %, corresponde al agua de preenvuelta y al agua de la emulsión bituminosa. Este porcentaje de agua se fijó en un 12,5 %, con el fin doble de no inducir en más variables de estudio, y por otro lado, proporcionar un porcentaje de agua intermedio entre los valores máximos y mínimos. El porcentaje de betún debe hallarse entre en un 6 % y un 8 %, por lo tanto, se hicieron tres familias de probetas con

porcentajes de betún del 6 %, 7 % y 8 %. Los porcentajes de betún, emulsión y agua se detallan en la Tabla 4.6. para las tres familias.

Porcentajes	MIC1	MIC2	MIC3
% betún	6	7	8
% emulsion bituminosa	10,0	11,7	13,3
% agua en la emulsión	4,0	4,7	5,3
% agua de preenvuelta	8,5	7,8	7,2
% agua de amasado	12,5	12,5	12,5

Tabla 4.6. Porcentajes de betún, emulsión bituminosa y agua de las diferentes familias de probetas conformadas.

Definidas las familias se realizó en ensayo de pérdida por abrasión en vía humedad o de desgaste según la norma UNE-EN 12274-5 a todas las muestras de cada familia de mezclas bituminosas conformadas. Este ensayo es esencial para evaluar objetivamente el comportamiento de la mezcla bituminosa ante el tránsito de vehículos. Los resultados de este ensayo para las tres familias son comparados con los resultados máximos permitidos por la normativa española.

Posteriormente, se calcula el porcentaje de aditivo necesario para obtener un tiempo de rotura adecuado. Un tiempo de rotura rápido provocaría que la mezcla no se homogenizara correctamente y que existieran problemas para su extensión en carretera; por otra parte, un tiempo de rotura largo provocaría un retraso considerable de adquisición de resistencia de la mezcla bituminosa y en consecuencia un mayor tiempo para la apertura al tráfico. Por lo tanto, de las tres familias de mezclas conformadas se calculó el porcentaje de aditivo a adicionar para obtener un tiempo de rotura de 35 segundos y una buena cohesión inicial

Finalmente, para evaluar la cohesión de la mezcla para la rápida apertura al tráfico de la carretera tras la ejecución del tratamiento superficial, se realizó el ensayo de determinación de la cohesión de la mezcla según la norma UNE-EN 12274-4. Este ensayo consiste en aplicar una carga sobre un pisón de goma que apoya sobre el tratamiento superficial, posteriormente se la hace girar a diferentes tiempos y se mide el par de torsión necesario. El resultado principal de este ensayo es el torque a los 60 ± 1 min.

Con todos los resultados de las diferentes familias de mezclas bituminosas fabricadas se procede a evaluar la mejor opción económica, técnica y ambiental.

4.2.2.3.1. Determinación de la curva granulométrica con la combinación de escorias de horno de arco eléctrico y arena silícea. Determinación de la granulometría de las partículas (UNE-EN 933-1:2012)

La curva granulométrica de los áridos es esencial de evaluar con exactitud por diferentes motivos. Entre ellos se encuentra la economía del producto, las capacidades resistentes del producto final, así como la calidad del mismo. La granulometría de este tratamiento superficial de adherencia está conformada por escorias de horno de arco eléctrico y arena silícea. La elección de esta combinación granulométrica está motivada por un motivo fundamental, el utilizar las escorias de horno de arco eléctrico como árido resistente y aprovechar al máximo su dureza y microtextura para el tratamiento. Las fracciones más finas de la mezcla bituminosa en estudio se compone de arena silícea, ya que el proceso de producción de escorias de horno de arco eléctrico genera un reducido porcentaje de árido fino y sería necesario la trituración de este material. Como el fin es la obtención de un tratamiento superficial de adherencia de calidad y económico, se evita la trituración de las escorias de horno de arco eléctrico para la obtención de este árido fino y se emplea directamente una arena silícea compatible químicamente con las escorias. De esta forma se reduce el coste de la trituración de las escorias y se aprovechan las características del árido grueso de las mismas.

Para la obtención de la curva granulométrica del tratamiento superficial o microgalomerado en frío es necesario primeramente la obtención de la curva granulométrica de los dos componentes fundamentales que la van a conformar. Por un lado, se obtiene la curva granulométrica de la arena silícea de tamaño máximo 6 mm a través de la norma UNE-EN 933-1. Posteriormente, las escorias de horno de arco eléctrico son tamizadas para la obtención de la curva granulométrica según la misma normativa detallada. Cabe desatacar que el tamaño máximo de árido de las escorias de horno de arco eléctrico es superior al máximo tamaño de árido de la mezcla bituminosa, 8 mm. Por lo tanto, y tras calcular la curva granulométrica de las escorias se tamizan las mismas por el tamiz 8 mm para obtener una nueva curva granulométrica combinable con la

arena. El proceso de tamizado por el tamiz 8 mm es fácilmente extrapolable a fábrica y supone un reducido coste económico, ya que es un tratamiento sencillo y usual realizado en áridos.

Con la curva granulométrica de las escorias de horno de arco eléctrico inferior a 8 mm y la curva granulométrica de la arena sílicea se establece la combinación de ambos materiales para que se obtenga una curva granulométrica encajada dentro del huso granulométrico fijado por la normativa.

4.2.2.3.2. Determinación de la envuelta y la resistencia al desplazamiento por el agua de las emulsiones bituminosas (NLT-196/84)

Evaluada la curva granulométrica, y en consecuencia, el porcentaje de combinación de ambos materiales, arena de sílice y escorias de horno de arco eléctrico, se procede a calificar la compatibilidad de la emulsión bituminosa C60B4 MIC.

La compatibilidad de la emulsión en este tipo de mezcla bituminosa es esencial, ya que el elevado contenido de árido grueso debe ser mantenido en la matriz de la mezcla por el efecto combinado del betún y el árido fino. Una inadecuada envoltura del árido por una incompatibilidad química entre la emulsión bituminosa empleada y la arena sílice o las escorias de horno eléctrico, condicionaría un rápido arranque de los áridos de mayor tamaño por el paso continuo de los vehículos y en consecuencia una pérdida de la totalidad de la adherencia del tratamiento. Para evitar este enorme problema que condicionaría la inutilidad del tratamiento superficial, debe evaluarse la adherencia de la emulsión con el árido, así como en situaciones adversas como es su contacto con el agua.

La emulsión empleada es una emulsión catiónica que combina perfectamente con la basicidad del pH de las escorias de horno de arco eléctrico, así como con la arena sílicea. El tiempo de rotura lento de la emulsión condiciona un tiempo adecuado de manejabilidad, trabajabilidad y mezclado de los diferentes elementos, condicionando también un tiempo suficiente para su extensión en carretera. No obstante, y gracias a la incorporación del aditivo, se puede reajustar el tiempo de rotura condicionando una mayor optimización de la ejecución, una menor alteración del tráfico y un proceso de mayor calidad.

Para evaluar la calidad de la emulsión bituminosa se realiza el presente ensayo. Este ensayo consiste como se ha descrito con anterioridad en la mezcla de 365 gramos de la mezcla de escorias e horno de arco eléctrico y arena silíceas en la proporción determinada, con 35 gramos de emulsión. Se mezclan ambos materiales hasta la obtención de la mezcla homogénea y se vierte la mitad de la misma sobre un papel filtrante. La mitad restante es rociada suavemente con agua hasta que esta aparezca totalmente limpia, vertiendo posteriormente esta mezcla sobre papel filtrante y dejando su contenido para su secado. Finalmente se valora la cubrición de la mezcla antes y después del riego con agua, evaluando la compatibilidad de la emulsión con los áridos de escorias de horno de arco eléctrico y la arena silícea.

4.2.2.3.3. Determinación del contenido mínimo de ligante y resistencia al desgaste (UNE-EN 12274-5:2020)

Determinado el porcentaje de combinación de las escorias de horno de arco eléctrico y la arena silícea, así como la compatibilidad de ambos materiales con la emulsión bituminosa, se procede a conformar diferentes mezclas con los porcentajes de emulsión fijados en la Tabla 4.6.. Estas mezclas serán sometidas a un ensayo esencial dentro de los tratamientos superficiales, siendo este la evaluación de la pérdida de partículas o desgaste por abrasión en vía húmeda. Este ensayo evalúa de forma objetiva la pérdida de partículas que sufriría el pavimento en carretera bajo la acción continua de los vehículos y de forma acelerada, ya que emplea la vía húmeda y la abrasión como agentes perjudiciales para el material.

El ensayo consiste en el cálculo de pérdida de partículas del tratamiento superficial tras la acción de un rodillo de caucho duro con una presión determinada y con un movimiento planetario durante 5 minutos sobre la superficie de una probeta o muestra de la lechada bituminosa o microaglomerado preparada. Estas probetas han sido conformadas según los regímenes establecidos por cada familia y han sido curadas posteriormente para su ensayo. A su vez, y con el fin de evaluar la calidad del tratamiento en las peores condiciones de ensayo, la probeta es sumergida en agua durante su ensayo.

La mezcla bituminosa formada por las escorias de horno de arco eléctrico, la arena silíceas, el agua de preenvuelta y la emulsión bituminosa en el porcentaje determinado, debe ser mezclada y extendida, para posteriormente ser curada hasta masa constante en estufa a la temperatura de 60 ± 5 °C. La muestra obtenida junto con la placa de ensayo es pesada para el cálculo de su masa. Posteriormente la muestra sobre la placa de ensayo se deja enfriar a temperatura ambiente y se sumerge seguidamente en agua en un baño a la temperatura de 25 ± 2 °C durante un periodo de 60 a 75 minutos. Tras este proceso la muestra es anclada en la maquina normalizada y sometida a la acción de un cilindro de caucho duro con movimiento planetario y durante un tiempo de 300 ± 2 segundos. Finalizado el ensayo se retira la muestra y se lava suavemente junto a la placa de ensayo con una corriente de agua, eliminando de esta forma cualquier partícula desprendida que haya podido quedar adherida a la mezcla bituminosa y que perjudique al ensayo. La probeta lavada se coloca en estufa a 60 ± 5 °C hasta masa constante, midiendo posteriormente la masa de la probeta tras su ensayo y a temperatura ambiente. La pérdida de masa de la muestra de ensayo, realizada a un mínimo de tres probetas por cada familia, se expresa según la siguiente fórmula (4.9).

$$L = W_a - W_b$$

Fórmula 4.9. Fórmula para determinar la pérdida de masa.

Donde:

- L es la pérdida de masa de la muestra durante el ensayo en gramos.
- W_a es la masa de la muestra junto con la placa antes de la realización del ensayo y expresada en gramos.
- W_b es la masa de la muestra junto con la placa después de la realización del ensayo y expresada en gramos.

A su vez, el valor obtenido debe multiplicarse por un factor de conversión de 32,8 con el objetivo de calcular la pérdida de masa de la muestra en gramos por metros cuadrado.

Las diferentes familias de mezclas son procesadas según las indicaciones del presente ensayo para la obtención de los resultados de la pérdida de partículas.

4.2.2.3.4. Determinación del porcentaje de aditivo para el control de la rotura de la emulsión. Ensayo de envuelta (NLT-196/84)

La emulsión bituminosa es uno de los materiales esenciales dentro de la mezcla bituminosa, ya que este elemento es el que proporciona el ligante necesario para la sujeción de los áridos y, en consecuencia, para evitar que se desprendan por el paso de los vehículos. La ventaja de la utilización de este tipo de ligante es clara y objetiva, poder llevar a cabo las operaciones de mezclado y extensión sobre el pavimento a temperatura ambiente, no obstante, deben tenerse en cuenta una serie de consideraciones. Primeramente debe evaluarse la compatibilidad de la emulsión bituminosa con el árido utilizado, esta compatibilidad ha sido calificada por el ensayo anterior. Posteriormente, deben adecuarse los tiempos de rotura de emulsión a los tiempos de mezclado y extendido, ya que en el caso contrario la mezcla de los áridos con la emulsión bituminosa sería incorrecta y dificultaría enormemente su extensión sobre el pavimento, creando de esta forma un tratamiento superficial inadecuado. A su vez, un tiempo de rotura elevado provocaría un mayor tiempo necesario para que el tratamiento superficial posea las características mínimas para la circulación de vehículos, influyendo notablemente en el tráfico.

Para evitar este problema y condicionar los tiempos de rotura de emulsión a los tiempos de producción se emplean usualmente aditivos en este tipo de mezclas bituminosas. Estos aditivos modifican el tiempo de rotura de emulsión según el porcentaje de adición en la mezcla bituminosa, obteniendo por lo tanto tiempos menores de rotura que condicionan una rápida apertura de la infraestructura al tráfico.

Usualmente, los tiempos de rotura adecuados para que se produzca en ese intervalo el mezclado de la emulsión con el árido y el agua, así como su extensión con parámetros adecuados e calidad, oscilan entre 30 y 40 segundos. Por lo tanto, para esta investigación se ha seleccionado como tiempo adecuado de rotura 35 segundos.

Para la obtención de este tiempo de rotura es necesaria la incorporación de un aditivo en un porcentaje determinado, siendo este el propósito principal de este apartado. Por lo tanto, las tres mezclas detalladas en la Tabla 4.6. son adicionadas con porcentajes crecientes de aditivo y mezcladas para el cálculo del tiempo de rotura de

emulsión. Se realizan para cada mezcla cuatro porcentajes de incorporación de aditivo y se evalúa gráficamente, tras representar los puntos de porcentaje de aditivo y el tiempo de rotura, cual es el porcentaje de aditivo que produce una rotura de la emulsión en 35 segundos. Este porcentaje de aditivo calculado gráficamente es corroborado a través de una nueva mezcla bituminosa con tal porcentaje, determinando si es correcta la aproximación gráfica. En el caso de que no fuera correcta, se modificaría levemente el porcentaje de adición del aditivo para la obtención del tiempo de rotura de 35 segundos. Finalmente, se obtiene para cada una de las mezclas bituminosas detalladas en la Tabla 4.6. el porcentaje de aditivo a adicionar necesario para la obtención de un tiempo de rotura de 35 segundos.

El ensayo para la determinación del tiempo de rotura consiste básicamente en la medición del tiempo de mezclado hasta la comprobación de la rotura de emulsión y tras haberse mezclado los áridos conformantes, escorias de horno de arco eléctrico y arena silícea. Es decir, primeramente se mezclan los dos tipos de áridos detallados en la proporción determinada para, posteriormente, añadir el porcentaje de emulsión con aditivo correspondiente de cada familia. La mezcla se agita manualmente con una espátula hasta la observación de la rotura de la emulsión, anotando este tiempo como el tiempo de rotura. La rotura de emulsión es fácilmente observable para los laboristas con experiencia, mostrando la mezcla una menor facilidad para su mezclado y una mayor resistencia al movimiento. Es por ello imprescindible realizar este ensayo manualmente para percatarse de estas particularidades, ya que si se ejecutara con medios mecánicos estos procesos pasarían desapercibidos.

En definitiva y tras el ensayo de las tres familias de mezclas bituminosas se obtiene un porcentaje de aditivo para cada una de ellas que proporcione un tiempo de rotura de 35 segundos que pueda ser comparado.

4.2.2.3.5. Determinación de la cohesión de la mezcla (UNE-EN 12274-4:2020)

Evaluada la compatibilidad de la emulsión bituminosa con las escorias de horno de arco eléctrico y la arena silícea, determinado el porcentaje de pérdida de partículas por abrasión o desgaste y cuantificado el porcentaje de aditivo para la obtención de un tiempo de rotura adecuado, debe evaluarse la cohesión de la mezcla bituminosa. La

cohesión de la mezcla bituminosa influye en diferentes aspectos, por una parte, en la adherencia del tratamiento superficial con la capa superficial del pavimento, y por otra parte, en la consistencia adecuada de la mezcla bituminosa para la apertura al tráfico tras la realización del pavimento. Es decir, tras determinar el porcentaje de combinación de los áridos y el porcentaje de aditivo detallado, así como los porcentajes de agua de preenvuelta y de emulsión de cada una de las familias, se procede a la determinación de la cohesión de las mezclas bituminosas, imprescindible, para calcular el tiempo necesario para la apertura al tráfico.

El procedimiento de ensayo conste en el detallado en la normativa mencionado, consistiendo principalmente en la fabricación de probetas normalizadas en las diferentes mezclas bituminosas detalladas en la Tabla 4.6. con el porcentaje de combinación de escorias de horno de arco eléctrico y arena silícea fijado, así como con los porcentajes de emulsión y agua bituminosa fijados. Estas probetas normalizadas para este ensayo son sometidas a la acción de una zapata en el equipo de cohesímetro. El equipo aplica a través de la zapata un giro tras aplicar una carga a la misma y midiendo el par de torsión necesario a diferentes tiempos de curado. Finalmente se tomó como valor o resultado el par de torsión a un tiempo de curado de 60 minutos. Por lo tanto, el valor de cohesión indica el tiempo que debe esperarse para poder abrir al tráfico sin que se produzcan desprendimientos importantes.

Cabe destacar, que sean realizado modificaciones menores en el ensayo para la determinación del par de torsión necesario en 60 minutos de curado, no obstante, el procedimiento descrito en la norma difiere poco del realizado.

4.2.2.4. Mezclas bituminosas SMA (Stone Mastic Asphalt) con escorias de horno de arco eléctrico y escorias de horno cuchara

Las anteriores mezclas bituminosas detalladas en la metodología utilizaban al máximo las características particulares de las escorias de horno de arco eléctrico y de las escorias de horno cuchara. Por una parte, la resistencia a la fragmentación, así como al pulimiento, fueron propiedades esenciales para la viabilidad de la utilización de escorias de horno de arco eléctrico en mezclas bituminosas de granulometría discontinua con emulsión y en tratamientos superficiales de adherencia o microaglomerados. A su vez,

las características cementantes de las escorias de horno cuchara proporcionaron al firme reciclado una adecuada resistencia como posteriormente se detalla en el siguiente apartado. Por lo tanto, el fin de la mezcla bituminosa tipo SMA es la evaluación del comportamiento de mezclas bituminosas de alta calidad con ambas escorias.

En definitiva, en esta investigación se desarrolla una mezcla bituminosa en caliente de calidad, tipo Stone Mastic Asphalt, para carreteras de tráfico importantes con escorias de horno de arco eléctrico como árido grueso y fino, con escorias de horno cuchara como filler y con fibras de celulosa desechadas de la industria papelera como aditivo. Para ello, y tras la caracterización física, química y mecánica de las escorias de horno de arco eléctrico y de las escorias de horno cuchara, se procede a la fabricación de diferentes familias de mezclas bituminosas con diversos porcentaje de betún y, obviamente, en caliente. En la Tabla 4.7. se muestran los materiales conformantes de las diferentes mezclas bituminosas, siendo estas escorias de horno de arco eléctrico, escorias de horno cuchara, áridos corneanos y filler calizo.

Grupo de muestra	ACFC	ASFC	ASFS
Árido grueso	Árido corneano	EAFS	EAFS
Árido fino	Árido corneano	EAFS	EAFS
Filler	Calizo	Calizo	LFS
Aditivos	Desecho de Papelera	Desecho de Papelera	Desecho de Papelera

Tabla 4.7. Familias de mezclas bituminosas conformadas con escorias de horno de arco eléctrico, árido corneano, escorias de horno cuchara, filler calizo y fibras de la industria papelera.

Como se observa en la Tabla 4.7., existen familias de mezclas bituminosas conformadas con materiales vírgenes y familias conformadas con residuos. De esta forma es fácilmente comparable la bondad de la incorporación de los residuos. A su vez, existen familias que contienen como filler escorias de horno cuchara y familias cuyo filler es calizo, de esta forma puede evaluarse las ventajas o inconvenientes de la incorporación de escorias de horno cuchara en las mezclas bituminosas.

Los materiales que desempeñan la función de agregado, ya sean residuo o áridos naturales, fueron secados y tamizados por diferentes tamices para la obtención de la curva granulométrica deseada. La curva granulométrica utilizada corresponde a la curva granulométrica intermedia establecida por el huso granulométrico detallado en la normativa Orden Circular OC 3/2019. La selección de esta curva granulométrica está

motivada por una razón esencial, comparar la diferencia de las mezclas bituminosas conformadas con áridos naturales y con escorias. Para ello deben poseer la misma granulometría evitando así variables secundarias que pudieran enmascarar las conclusiones finales. Según lo comentado, la curva granulométrica para las tres familias de muestras es la que se detalla en la Figura 4.2..

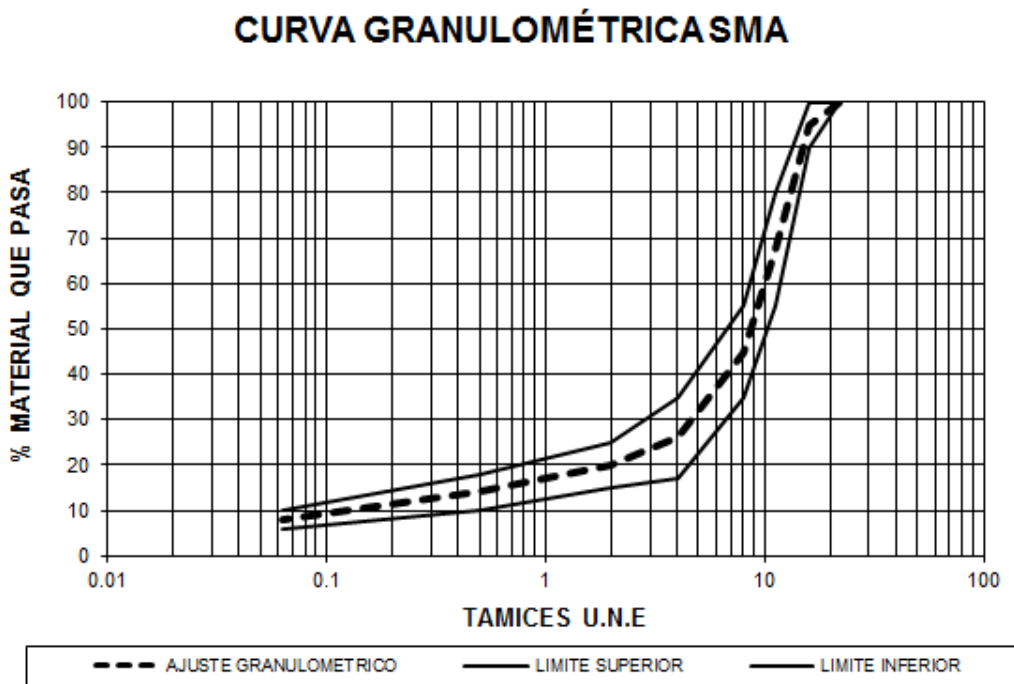


Figura 4.2. Curva granulométrica de las diferentes familias de mezclas bituminosas (ACFC, ASFC y ASFC) tipo SMA.

Definida la curva granulométrica se procedió a conformar diferentes grupos de muestras de los tres tipos de mezclas bituminosas detallados en la Tabla 4.7.. Para poder comparar fielmente los resultados, y dado que las escorias de horno de arco eléctrico poseen una densidad superior a los áridos cornéanos, se dosificó el porcentaje de betún en volumen. Esta dosificación en volumen permite evaluar objetivamente la capacidad de absorción de betún de las mezclas bituminosas con escorias, ya que si se hiciera una dosificación en masa el porcentaje de betún óptimo no sería comparable debido a la densidad elevada de las escorias.

En base a lo comentado, las familias de mezclas fueron fabricadas con porcentajes de betún en volumen y sobre árido del 15 % al 18 % en incrementos de 0,5 %. Para ello, los áridos (naturales o residuos) fueron calentados en estufa a la temperatura de 180 ± 5

°C durante 1 hora, al igual que el betún, para posteriormente mezclarse en amasadora planetaria automática durante 10 ± 1 min. La mezcla resultante fue extraída y compactada por compactador de impactos con 50 golpes por cara de cada probeta (norma UNE-EN 12697-30). Las probetas conformadas se dejaron a temperatura ambiente durante 24 horas para su posterior desencofrado por medios mecánicos. Se realizaron un total de 8 probetas tipo Marshall por cada porcentaje de betún de cada familia.

Obtenidas los grupos de muestras con porcentajes crecientes de betún de cada familia de probetas, se procedió a la caracterización de las propiedades físicas. Los ensayos realizados fueron en el de densidad máxima de la mezcla bituminosa (norma UNE-EN 12697-5) y densidad aparente (norma UNE-EN 12697-6). A su vez se calculó el índice de huecos de las mezclas bituminosas obtenidas (norma UNE-EN 12697-8).

Para evaluar la resistencia mecánica de las familias de mezclas bituminosas conformadas se ejecutó el ensayo Marshall (norma UNE-EN 12697-14). Con este ensayo se pueden evaluar las deformaciones plásticas que suceden en cada mezcla bituminosa, siendo esta una característica esencial debido al porcentaje elevado de betún que poseen las mezclas bituminosas SMA.

Con las combinaciones óptimas de materiales para las tres familias de muestras (ACFC, ASFC y ASFS), se realizó el ensayo de escurrimiento de ligante UNE-EN 12697-18, para evaluar que las fibras cumplieran su función dentro de las mezclas bituminosas conformadas y que no existía exudación de betún por su alto porcentaje. A su vez, se realizó en ensayo de rodadura o ensayo pista UNE-EN 12697-22 para evaluar que las diferentes familias de mezclas bituminosas conformadas poseían un comportamiento adecuado ante el paso continuo de vehículos.

A continuación se definen los ensayos mencionados, cuyos resultados aparecen en el siguiente apartado, describiéndose el modo de realización así como los objetivos perseguidos por su ejecución.

4.2.2.4.1. Determinación de la densidad máxima (UNE-EN 12697-5:2020)

La densidad máxima como se ha comentado en apartado anterior, es una propiedad física imprescindible que debe ser determinada para todos los porcentajes de

betún de las tres familias. La densidad máxima fue calculada de las probetas conformadas de cada familia, reflejando la densidad de las mezclas bituminosas sin tener en cuenta los huecos o volumen de aire. Por lo tanto, y dada la mayor densidad de las escorias de horno de arco eléctrico, es esperable una mayor densidad de las probetas fabricadas con ellas y respecto a las mezclas bituminosas conformadas con áridos comerciales, en este caso corneanos.

El cálculo de la densidad máxima se realiza según la norma mencionada, utilizando para su ejecución el método hidrostático y definido anteriormente en el apartado 4.2.2.1.5..

4.2.2.4.2. Determinación de la densidad aparente (UNE-EN 12697-6:2012)

La densidad aparente junto con la densidad máxima son parámetros esenciales que definen las mezclas bituminosas esta densidad aparente ha sido calculada para las diferentes probetas de cada familia a través del método hidrostático, detallado en el apartado 4.2.2.1.6.. Este método se ha seleccionado, entre los diversos propuesto por la normativa mencionada, porque el volumen de huecos de mezcla hacia posible la formación de la superficie saturada seca; a diferencia de las mezclas de granulometría discontinua o mezclas abiertas en frío en el cual el agua no queda retenida en los huecos y su utilización es desaconsejable.

Al igual que sucede con la densidad máxima, la densidad aparente aun teniendo en cuenta los huecos en el cálculo del volumen, será mayor para las probetas que incorporen escorias de horno de arco eléctrico, ya que la densidad de las mismas es superior.

4.2.2.4.3. Determinación del contenido de huecos (UNE-EN 12697-8:2020)

El contenido de huecos en mezcla, calculado a partir de la densidad aparente y la densidad máxima, es un parámetro físico que condiciona enormemente las características de las mezclas bituminosas ejecutadas en carretera. Un mayor índice de huecos en mezcla implica una mayor absorción del agua de lluvia, una mejor regularidad superficial, e incluso una mayor absorción de ruido. Además la granulometría discontinua de las mezclas bituminosas SMA propician este mayor índice

de huecos respecto a mezclas de granulometría discontinua, sin obtener obviamente un porcentaje tan elevado como el de las mezclas drenantes. A su vez, el índice de huecos en mezcla es una característica que determina el funcionamiento de cada elemento en la mezcla bituminosa conformada, demostrando que un mayor índice de huecos es obtenido por un porcentaje inferior de árido fino y en consecuencia por un mayor trabajo del árido grueso. Por lo tanto, este árido grueso debe poseer una calidad adecuada para evitar problemas posteriores de fragmentación y deterioro de la mezcla, siendo esta la función principal de la escoria de horno de arco eléctrico.

El cálculo de índice de huecos o contenido de huecos en mezcla se realizó según el procedimiento y la formulación detallado en el apartado 4.2.2.1.7.. Este cálculo se realizó para todos los grupos de probetas con diferentes porcentajes de betún y para las diferentes familias.

4.2.2.4.4. Ensayo Marshall (UNE-EN 12697-34:2013)

El ensayo Marshall es fundamental en las mezclas bituminosas para el cálculo de las deformaciones plásticas, aun más en mezclas con elevados porcentajes de betún como son las mezclas tipo SMA. Este ensayo tradicional valora y califica a través de los parámetros de estabilidad y deformación el comportamiento de las mezclas bituminosas en carretera, determinando si la mezcla es incorrecta para su uso por problemas posteriores de deformaciones plásticas.

Por lo tanto, y en base a lo comentado, este ensayo se realizó a todas las probetas obtenidas por compactador de impactos de las tres familias y con el procedimiento descrito. Además fue el ensayo utilizado como principal para la determinación del contenido óptimo de betún, ya que se ensayaron todas los grupos de muestras de cada familia y se selección como porcentaje de betún adecuado aquel que propiciaba una mayor estabilidad Marshall, siempre y cuando las deformaciones obtenidas y las propiedades físicas de las mezclas fueran adecuadas.

La elección de este ensayo como el principal para la determinación de la combinación óptima de materiales o la fórmula óptima de trabajo, está motivada por diferentes razones. Por una parte, es un ensayo que se ha realizado durante décadas y supone una seguridad frente al comportamiento de las mezclas bituminosas, siempre y

cuando se cuantifiquen otras propiedades a través de otros ensayos. Por otra parte, el mayor porcentaje de betún puede crear problemas de deformaciones plásticas, suponiendo este caso el fracaso absoluto de la formulación de la mezcla, así como de todas las propiedades obtenidas de la mezcla. Y finalmente, para la evaluación de la resistencia mecánica de las mezclas bituminosas. Además, es un ensayo rápido y seguro que permite cuantificar la calidad de las mezclas para la posterior ejecución de diferentes ensayos que completen el estudio.

El ensayo Marshall se realizó para todas las probetas de todos los grupos de cada familia y según el procedimiento descrito en el apartado 4.2.2.2.8.. Con la obtención de los resultados de estabilidad y deformación se presentaron gráficamente los resultados en función del porcentaje de betún, visualizando rápidamente cual era el porcentaje que proporcionaba una mayor estabilidad Marshall.

4.2.2.4.5. Ensayo de escurrimiento de ligante (UNE-EN 12697-18:2018)

Las mezclas bituminosas poseen, como se ha comentado, un porcentaje elevado de betún gracias a la incorporación de fibras de celulosa. Estas fibras absorben el mayor porcentaje de ligante para evitar problemas posteriores de exudaciones. No obstante, este mayor porcentaje de betún también hace posible formar un mastic de mayor calidad y en consecuencia, capaz de soportar mejor las cargas repetidas de tráfico por tracción, condicionando a la mezcla bituminosa una mayor vida útil. Este mayor porcentaje de betún debe siempre estar combinado con las fibras, el árido fino y el filler para evitar su exudación, sino fuera así provocaría el fracaso de la mezcla bituminosa.

Según lo comentado y para corroborar la inexistencia de escurrimiento de betún, se realiza el presente ensayo. Este ensayo se realizó para las tres familias de mezclas bituminosas detalladas y con el porcentaje óptimo de betún calculado según el ensayo Marshall. De esta forma se evalúa la inexistencia de escurrimiento de ligante y en consecuencia la aptitud de las mezclas bituminosas para su empleo en carretera.

El método de ejecución del ensayo es el conocido como el método de la cesta y es el que se describe a continuación. Primeramente, se pesan 1,1 kg de árido de densidad $2,65 \text{ Mg/m}^3$, no obstante, si la densidad del árido es mayor como es el caso de las escorias se realiza las oportunas correcciones volumétricas. Posteriormente este árido es

mezclado con el porcentaje óptimo de betún detallado anteriormente y según el procedimiento usual. A su vez, se pesa una bandeja metálica con el papel de aluminio y se anota la masa de estas, para posteriormente colocar la cesta normalizada de ensayo con la mezcla en su interior e introducir en estufa durante un tiempo comprendido entre 3 horas y 3 horas y cuarto. La temperatura de la estufa durante el tiempo de ensayo es la correspondiente a la temperatura de compactación más 25 grados Celsius. Finalmente se extra la bandeja y la cesta, anotándose nuevamente el peso de la bandeja con el papel de aluminio cuando se haya enfriado lo suficiente. Obviamente si existiera betún escurrido durante el ensayo este quedaría sobre el papel de aluminio y podría ser cuantificado a través de la siguiente formula (4.10.).

$$BD = 100 * (W_2 - W_1)/(A + B + X)$$

Fórmula 4.10. Fórmula para determinar el material escurrido.

Donde:

- BD es el material escurrido, en porcentaje (%)
- W_1 es la masa inicial de la bandeja y del papel de aluminio, en gramos.
- W_2 es la masa final de la bandeja y del papel de aluminio, en gramos.
- A es la masa inicial de áridos contenidos en la mezcla, en gramos.
- B es la masa inicial de ligante contenido en la mezcla, en gramos.
- X es la masa inicial de fibras contenidas en la mezcla, en gramos.

Los resultados son expresados y valorados para la combinación óptima de materiales de las tres familias de probetas conformadas con escorias de horno de arco eléctrico, escorias de horno cuchara, árido corneano y filler calizo.

4.2.2.4.6. Ensayo de rodadura (UNE-EN 12697-22:2008+A1:2008)

Las diferentes familias de mezclas bituminosas han sido evaluadas con el ensayo Marshall, obteniendo el porcentaje óptimo de betún que proporcionaba la mayor resistencia Marshall. No obstante, existen otros parámetros fundamentales en las mezclas bituminosas que deben ser cuantificados. Uno de los ensayos que mayor información proporciona sobre el comportamiento de la mezcla bituminosa en carretera

y tras ejecución es el ensayo de rodadura o pista. Este ensayo determina la susceptibilidad de los materiales bituminosos a deformarse cuando están sometidos a cargas.

La susceptibilidad de los materiales a deformarse se cuantifica por la rodera que se forma por las continuas pasadas, a una temperatura determinada, de una rueda normalizada con una carga establecida. El fin por lo tanto del ensayo es evaluar de forma bastante precisa el comportamiento de la mezcla bituminosa durante su vida útil, así como la afección en las variaciones de los parámetros físicos de la mezcla por el paso sucesivo y continuo de vehículos.

Para la realización del ensayo se compactan probetas de las tres familias de mezclas bituminosas evaluadas y con la combinación óptima de materiales. Estas probetas son diferentes a las obtenidas por compactador de impactos para el ensayo Marshall, no obstante, deben poseer una densidad mayor al 98 % de la densidad obtenida por el ensayo Marshall. Las probetas son compactadas para este ensayo con rodillo de acero según la norma UNE-EN 12697-33 y según las condiciones de temperatura y mezclado establecidas anteriormente. Las probetas son sometidas en el equipo de ensayo y con el dispositivo pequeño de rodadura, con el procedimiento B en aires y con la temperatura de 60 °C a 10.000 ciclos.

Posteriormente se mide la deformación en diferentes puntos y respecto el espesor de la probeta se calcula el porcentaje de la profundidad de rodera según la fórmula 4.11..

$$P_i = 100 * \sum_{j=1}^{15} \frac{(m_{ij} - m_{oj})}{(15 * h)}$$

Fórmula 4.11. Fórmula para determinar el porcentaje de la profundidad de rodera.

Donde:

- P_i el porcentaje de la profundidad de rodera.
- m_{ij} es la deformación local, en milímetros.
- m_{oj} es la medida inicial en la ubicación j ,
- h es el espesor de la probeta, en milímetros.

5. Resultados y discusión

En este apartado se muestran los resultados de los ensayos de caracterización de los materiales iniciales y de la conformación de las diferentes mezclas bituminosas. A su vez, también se detalla la discusión de los resultados obtenidos y su comparación con los valores límites establecidos por la normativa, corroborando de esta forma la utilidad de las escorias de horno de arco eléctrico y de horno cuchara para la conformación de mezclas bituminosas.

5.1. Caracterización de las materias primas

Las escorias de horno de arco eléctrico, las escorias de horno cuchara, el firme reciclado y las fibras de celulosa son subproductos o residuos que poseen un valor para su reutilización. No obstante, deben de evaluarse una serie de parámetros para la corroboración de su funcionalidad y aplicación en mezclas bituminosas. En los siguientes apartados se describen los resultados de los ensayos realizados a los materiales comentados, así como la discusión de los mismos, confirmando o desechando aquellos materiales que no cumplen con la normativa al respecto.

5.1.1. Caracterización de las escorias de horno de arco eléctrico y las escorias de horno cuchara

Primeramente se caracterizaron física y químicamente las escorias en estudio. Las escorias de horno cuchara (LFS) se utilizaron como filler. Por lo tanto, estas escorias deben formar, junto con el betún y los aditivos, un mastic de calidad adecuada para resistir las cargas continuas de tracción del pavimento. Por ello, es esencial la caracterización química de las mismas determinando la existencia de compuestos químicos cementantes o elementos químicos contaminantes que deban ser controlados en procesos posteriores. En la Tabla 5.1 se muestran los resultados del análisis elemental de las escorias de horno cuchara.

Muestra	Nitrógeno, %	Carbono, %	Hidrógeno, %	Azufre, %
LFS	0,007 ± 0,001	3,405 ± 0,068	1,386 ± 0,026	0,000 ± 0,001

Tabla 5.1. Análisis elemental de las escorias de horno cuchara.

El análisis elemental de las escorias de horno cuchara muestra que efectivamente corresponde a un material inorgánico. Cabe destacar, el bajo porcentaje de nitrógeno y

azufre, siendo este último elemento muy perjudicial para la mezcla bituminosa final. Si existieran porcentajes importantes de azufre en las escorias, debería estudiarse la retención de este elemento en la mezcla bituminosa. Por otra parte, y debido al proceso de producción de escorias de horno cuchara, los porcentajes de carbono e hidrógeno existentes proceden directamente de los compuestos carbonatados e hidratados de los óxidos presentes en las escorias, como así lo reflejó la fluorescencia de rayos X. Este proceso es natural en este tipo de materiales y se debe principalmente a la exposición a la intemperie del residuo tras su extracción.

El ensayo de fluorescencia de rayos x proporcionó la información suficiente sobre el resto elementos químicos, este ensayo se encuentra detallado en la Tabla 5.2.

Compuesto	Porcentaje en peso, %	Error
CaO	40,19	0,25
MgO	19,38	0,20
SiO ₂	12,49	0,17
Al ₂ O ₃	7,29	0,13
Fe ₂ O ₃	2,38	0,08
MnO	0,936	0,047
S	0,548	0,027
TiO ₂	0,486	0,024
BaO	0,240	0,012
Na ₂ O	0,118	0,042
Cr ₂ O ₃	0,1100	0,0055
Cl	0,0833	0,0042
SrO	0,0733	0,0037
ZnO	0,0681	0,0034
K ₂ O	0,0506	0,0025
ZrO ₂	0,0425	0,0021
V ₂ O ₅	0,0179	0,0017
P	0,0138	0,0012
CuO	0,0117	0,0010
NiO	0,0082	0,0011
PbO	0,0048	0,0010
Nb ₂ O ₅	0,0046	0,0006
MoO ₃	0,0028	0,0009
Co ₃ O ₄	0,0021	0,0009
SeO ₂	0,0012	0,0005

Tabla 5.2. Ensayo de fluorescencia de Rayos X de las escorias de horno cuchara.

El ensayo de fluorescencia de rayos x muestra una composición química de las escorias de horno cuchara lógica y derivada de su proceso de producción. La existencia

de óxidos de calcio, óxidos de magnesio y óxidos de silicio en mayor proporción se debe principalmente al material de adición al horno cuchara para la purificación del acero. La incorporación de cal o dolomías en el horno cuchara crea esta composición de óxidos. Además, la función de las escorias de horno cuchara es la desoxidación y desulfuración del acero, por lo que es lógico encontrar óxidos metálicos y azufre en su composición. No obstante, no existen elementos químicos que pudieran perjudicar directamente las características mecánicas de las mezclas bituminosas, ni elementos contaminantes en gran proporción que pudieran ser lixiviados posteriormente y provocar una contaminación ambiental.

Por otro lado, las propiedades físicas de las escorias de horno cuchara fueron cuantificadas. Los ensayos principales para la determinación de estas propiedades, para un material que desempeña la función de filler en la mezcla bituminosa, se detallan en la Tabla 5.3.

Ensayo	Norma	Valor
Densidad de las partículas, t/m ³	UNE-EN 1097-7	2,71 ± 0,07
Densidad aparente, t/m ³	UNE-EN 1097-3	0,75 ± 0,01
Índice de plasticidad	UNE 103,103/UNE 103,104	Sin plasticidad

Tabla 5.3. Densidad y plasticidad de las escorias de horno cuchara.

Puede observarse como la densidad de las partículas de las escorias de horno cuchara es ligeramente superior a la de un filler calizo comercial. A su vez, la densidad aparente en queroseno de las escorias refleja el comportamiento de un material pulverulento, que sin llegar a producir problemas de dosificación en fábrica, si posee un tamaño de partícula reducido capaz de adherirse correctamente con el betún y formar un mastic de calidad. La inexistencia de plasticidad evita problemas posteriores de expansividad por la existencia de partículas arcillosas. Este valor nulo de plasticidad se debe a la composición química de las escorias de horno cuchara, ya que está compuesta principalmente por óxidos de calcio y de magnesio.

Por otra parte, las escorias de horno de arco eléctrico (EAFS) desempeñan la función de árido grueso y fino en la mezcla bituminosa. Por lo tanto, los ensayos realizados deben comprobar la idoneidad de las escorias para este fin. Para la

caracterización química se realizó el ensayo de análisis elemental, este ensayo se refleja en la Tabla 5.4.

Muestra	Nitrógeno, %	Carbono, %	Hidrógeno, %	Azufre, %
EAFS	0,005 ± 0,001	0,164 ± 0,003	0,044 ± 0,001	0,000 ± 0,001

Tabla 5.4. Análisis elemental de las escorias de horno de arco eléctrico.

El análisis elemental de las escorias de horno de arco eléctrico muestra principalmente su composición inorgánica. Los bajos porcentajes de carbono e hidrógeno reflejan que estas escorias son un material más estable que las escorias de horno cuchara, ya que no se producen procesos de carbonatado o hidratado de los compuestos químicos. Cabe destacar los valores nulos de azufre y nitrógeno, por lo que no se producirán lixiviados de estos elementos en las mezclas bituminosas finales. El resto de elementos químicos presentes en la muestra de escorias de horno de arco eléctrico fue determinado con el ensayo de fluorescencia de rayos x. Este ensayo se muestra en la Tabla 5.5.

Compuesto	Porcentaje en peso, %	Error
CaO	31,75	0,23
Fe ₂ O ₃	21,96	0,21
SiO ₂	17,52	0,19
Al ₂ O ₃	12,26	0,16
MnO	6,15	0,12
MgO	5,05	0,11
Cr ₂ O ₃	2,73	0,08
TiO ₂	0,955	0,047
BaO	0,658	0,033
P ₂ O ₅	0,319	0,016
SrO	0,186	0,0093
V ₂ O ₅	0,159	0,0079
Nb ₂ O ₅	0,0659	0,0033
S	0,0645	0,0032
ZrO ₂	0,0551	0,0028
K ₂ O	0,0289	0,0016
CuO	0,0254	0,0017
ZnO	0,0245	0,0016
Co ₃ O ₄	0,0147	0,0016
Eu ₂ O ₃	0,0137	0,0065
WO ₃	0,0104	0,0031
Y ₂ O ₃	0,0018	0,0005

Tabla 5.5. Ensayo de fluorescencia de Rayos X de las escorias de horno de arco eléctrico.

La composición química de las escorias de horno de arco eléctrico deriva directamente de su proceso de formación. Es de esperar un alto porcentaje de hierro, ya que proviene del acero, así como un alto porcentaje de óxido de calcio por su adición para obtener el material final. Los óxidos de silicio y aluminio son habituales en la chatarra que se utiliza para la fabricación de nuevos aceros. El magnesio, el manganeso y el cromo también son comunes en la composición del acero. Los demás elementos se encuentran en porcentajes tan pequeños que no se pueden extrapolar. El bajísimo porcentaje de azufre asegura que el lixiviado del EAFS no plantee un problema medioambiental, como ocurre con otros contaminantes. De lo contrario, tendría que estudiarse la lixiviación de estos contaminantes químicos y compararlos con los valores límite establecidos por la normativa. Cabe señalar que la existencia de óxidos, principalmente óxido de calcio, en la muestra inalterada de escoria de horno de arco eléctrico no causa ningún problema posterior de expansión en contacto con el agua. Este hecho se deriva del proceso industrial de formación de escoria: después de extraer el residuo, se riega con abundante agua. De esta forma se produce una carbonatación de los óxidos y la estabilidad de su estructura física.

Analizada la composición química de la escoria de horno de arco eléctrico y evaluada la inexistencia de elementos químicos que pudieran perjudicar la mezcla bituminosa final durante su fabricación o su vida útil, se procedió a determinar las propiedades físicas y resistentes de las escorias. La Tabla 6.6 refleja los ensayos físicos realizados a las escorias de horno de arco eléctrico.

Ensayo	Norma	Valor
Densidad de las partículas (árido grueso), t/m ³	UNE-EN 1097-7	3,13 ± 0,05
Densidad de las partículas (árido fino), t/m ³	UNE-EN 1097-7	3,34 ± 0,07
Equivalente de arena, %	UNE-EN 933-8	77 ± 2
Porcentaje de caras de fractura, %	UNE-EN 933-5	100 ± 1
Índice de lajas, %	UNE-EN 933-3	0 ± 1

Tabla 5.6. Propiedades físicas de las escorias de horno de arco eléctrico.

Como puede observarse en la Tabla 5.6, la densidad de las partículas de las escorias de horno de arco eléctrico es superior a la de un árido tradicional (aproximadamente 2,65 t/m³). Esta mayor densidad se debe a su composición química compuesta por elementos metálicos, principalmente hierro. No obstante, una mayor

densidad no perjudica el proceso de conformado de mezclas bituminosas ni a sus características finales, solamente debe tenerse en cuenta para la dosificación correcta del betún y los aditivos, así como para su comparación. Por otra parte, el ensayo de equivalente de arena refleja la baja proporción de partículas coloidales que existen en las escorias de horno de arco eléctrico, no existiendo por lo tanto problemas posteriores de expansividad en la mezcla bituminosa debidos a materiales arcillosos. Cabe destacar los resultados excelentes que se han obtenido de los ensayos de porcentaje de caras de fractura y del índice de lajas. Ambos ensayos reflejan la aptitud de las escorias para la conformación de mezclas bituminosas, ya que las cargas de compresión del tráfico son soportadas por el rozamiento del árido grueso. Por lo tanto, se exige al árido grueso que posea unos resultados óptimos de estos ensayos para que no se produzcan compactaciones de la mezclas bituminosa posteriores y debidas al paso continuo de vehículos. La obtención de esta excelente forma de las partículas de las escorias de horno de arco eléctrico se debe al proceso de producción de las mismas, ya que la oxigenación continua del horno provoca las formas irregulares y las aristas que poseen las partículas.

Como se ha mencionado, en las mezclas bituminosas las cargas repetidas de tracción provocadas por el tráfico las soporta el mastic de la mezcla formado por el filler, el betún y los aditivos. A su vez, las cargas de compresión las soporta principalmente el árido grueso por rozamiento entre partículas. Por lo tanto, si se pretende diseñar mezclas bituminosas para tráficos elevados, el árido grueso debe poseer una resistencia adecuada para evitar su fractura. Esta resistencia ha sido evaluada por los ensayos de resistencia a la fragmentación (norma UNE-EN 1097-2) y resistencia a los ciclos de hielo y deshielo (norma UNE-EN 1367-1) reflejando valores de $13 \pm 1 \%$ y $0,551 \pm 0.016 \%$ respectivamente. Estos resultados muestran la excelente resistencia de las escorias de horno de arco eléctrico tanto a la fractura como a la fatiga térmica, siendo por lo tanto solamente comparables con áridos de elevada calidad y muy costosos, económicamente y medioambientalmente.

A su vez, la fricción continua del neumático con el pavimento crea el pulimento del árido de la mezcla bituminosa, con la consiguiente disminución de seguridad para el conductor. Por lo tanto, es esencial realizar el ensayo de determinación del coeficiente de pulimento acelerado (norma UNE-EN 1097-8). Este ensayo reflejó un valor 58 ± 1 ,

asegurando una resistencia adecuada de las escorias ante el paso continuo de vehículos y una durabilidad en el tiempo de la rugosidad superficial.

Finalmente, para evaluar la calidad de las escorias de horno cuchara y horno de arco eléctrico para su empleo en mezclas bituminosas para carreteras se realizó el ensayo de lixiviados según la norma UNE-EN 12457-3. Cabe destacar que la normativa estatal española no controla actualmente el límite máximo de concentración de elementos contaminantes que puede lixiviarse en un residuo dentro del ámbito de utilización de carreteras, siendo solo tres comunidades autónomas País Vasco, Cantabria y Cataluña las que contempla unos máximos de concentración de unos elementos químicos determinados en el lixiviado. No obstante, la diferencia entre estos límites dependiendo de la comunidad autónoma difiere en algunos de los casos en un alto porcentaje. Los lixiviados de las escorias de horno de arco eléctrico y de las escorias de horno cuchara se muestran en la Tabla 5.7.

Elemento químico	EAFS, mg/kg	LFS, mg/kg
Ba	12,784	2,132
Cd	0,000	0,000
Cr	0,007	0,237
Mo	0,092	0,078
Ni	0,002	0,004
Pb	0,018	0,006
Se	0,080	0,035
V	0,008	1,175
Zn	0,021	0,112
As	0,000	0,000
Cu	0,066	0,105
Hg	0,000	0,000
Sb	0,011	0,012

Tabla 5.7. Concentración de los elementos químicos analizados en el lixiviado de las escorias de horno de arco eléctrico (EAFS) y en las escorias de horno cuchara (LFS) según la norma UNE-EN 12457-3.

Las concentraciones de los elementos químicos analizados en el lixiviado de las escorias de horno cuchara y horno de arco eléctrico cumplen con las restricciones establecidas por las tres comunidades autónomas mencionadas, a excepción del elemento químico selenio el cual está limitado por la normativa del país Vasco en 0,007 mg/kg. La limitación para este elemento químico en las comunidades de Cantabria y Cataluña es de 0,1 mg/kg. Esta limitación como se observa es muy diferente entre comunidades por

lo que puede establecerse que el lixiviado de selenio de las escorias es adecuado. Además, la normativa del País Vasco establece que para capas de rodadura el valor límite de selenio es de 0,2 mg/kg, por lo que se puede justificar perfectamente que no existirá problemas en los lixiviados de las escorias, más aun cuando se envuelvan por el betún de la mezcla bituminosa restringiendo su lixiviación.

En definitiva, y en base a los resultados de los ensayos de la caracterización de los residuos, se puede afirmar que tanto las escorias de horno de arco eléctrico, como las escorias de horno cuchara, poseen unas características adecuadas para su empleo en mezclas bituminosas. No obstante, si es cierto que deben tomarse unas precauciones especiales para conseguir el éxito de su incorporación en la mezcla asfáltica.

Posteriormente se detallan los resultados generales y las discusiones sobre los tres tipos de mezclas bituminosas conformadas, firmes reciclados con emulsión bituminosa in situ, mezcla de granulometría discontinua con emulsión bituminosa, y finalmente, tratamientos superficiales de alta adherencia.

5.1.2. Caracterización del firme reciclado

El firme reciclado fue analizado granulométricamente para la obtención de su curva granulometría, posteriormente y tras la extracción del ligante del firme fresado con la consecuente separación del árido, se determinó que el porcentaje del betún sobre árido era de un 4,3%. Este porcentaje es usual en mezclas bituminosas semidensas y granulometrías continuas utilizadas para carreteras de tráfico medio o bajo. A su vez se analizó el betún extraído mostrando los resultados que aparece en la Tabla 5.8.

Ensayo	Norma	Valor
Ensayo de penetración	UNE-EN 1426	7 ± 0 (1/10) mm
Punto de reblandecimiento	UNE-EN 1427	88 ± 2 °C

Tabla 5.8. Características del ligante recuperado del firme fresado.

Los resultados de penetración y punto de reblandecimiento corroboran lo esperable al tratarse de un firme envejecido por agotamiento, en el cual el ligante ha perdido su mayor parte elástica y se convierte en excesivamente duro. Cabe destacar que los valores de tal dureza del betún también están asociados al empleo en la zona donde

corresponde el firme, en la cual, se emplean betunes muy duros del tipo B 40/50 al ser una zona cálida.

Por otra parte, el árido extraído del firme y sin fresar para evitar la alteración, es analizado para corroborar la aptitud del mismo. Los resultados de los ensayos se detallan en la Tabla 5.9.

Árido grueso		
Ensayo	Norma	Valor / unidades
Proporción partículas trituradas	Une-en 933-5	93 %
Índice de lajas	Une-en 933-3	11 %
Coeficiente los ángeles, LA	Une-en 1097-2	19 %
Árido fino		
Ensayo	Norma	Valor / unidades
Índice de plasticidad, IP	Une 103103/une 103104	2,9 %
Equivalente de arena, SE	Une-En 933-8	79 %

Tabla 5.9. Ensayos del árido grueso y el árido fino del firme fresado.

Los resultados desprendidos de la Tabla 5.9 reflejan un árido grueso de resistencia mecánica aceptable y buena forma de partículas, más que suficiente para su empleo como árido en mezclas bituminosas de tráfico intermedios. El bajo índice de plasticidad así como un valor de equivalente de arena superior a 75 desecha la posible existencia de partículas arcillosas que pudieran ocasionar problemas posteriores por expansividad.

En línea a lo comentado puede clasificarse el firme fresado como apto para su uso en firmes reciclado in situ, no sin antes, corregir la granulometría con la adición de escorias blancas y estudiar su compatibilidad con la emulsión.

5.1.3. Caracterización de las fibras de celulosa

Las fibras de celulosa desechadas de la industria papelera fueron analizadas, tras el tratamiento descrito en la metodología, en analizador elemental para detectar el porcentaje de carbono, nitrógeno, hidrogeno y azufre existente en la muestra. Este ensayo es esencial para el material en estudio ya que, a diferencias de las escorias, su naturaleza es orgánica. En la Tabla 5.10 se detallan los resultados del análisis elemental de las fibras de celulosa desechadas de la industria papelera.

Sample	Nitrogen, %	Carbon, %	Hydrogen, %	Sulfur, %
CF	0,447 ± 0,008	44,489 ± 0,325	5,884 ± 0,178	0,000 ± 0,000

Tabla 5.10. Análisis elemental de las fibras de celulosa desechadas por la industria papelera.

Como puede observarse, el porcentaje de carbón e hidrogeno es elevado, ya que corresponde a un material orgánico. Por otra parte, el porcentaje de nitrógeno que contiene la muestra es reducido, siendo este un hecho a tener en cuenta ya que podría perjudicar la mezcla bituminosa final. A su vez, el porcentaje de azufre es nulo. Por lo tanto, la baja proporción de elementos como el nitrógeno y el azufre aseguran la buena incorporación de estas fibras en las mezclas bituminosas, ya que si no fuera así, podrían lixiviarse elementos contaminantes e incluso afectar a las características de las mezclas bituminosas. Cabe destacar, que la suma de los elementos analizados no corresponde al 100% de la composición química, por lo tanto, deben existir otros elementos químicos inorgánicos en las fibras analizadas. Estos elementos químicos inorgánicos podrían corresponder al tratamiento realizado a las fibras de celulosa antes de su utilización para el conformado de mezclas bituminosas, siendo este elemento principal el sodio, ya que se tratan las fibras con hidróxido de sodio.

A su vez, y para caracterizar de una forma completa las fibras de celulosa de la industria papelera, se realizó el ensayo de microscopio electrónico de barrido. Este ensayo tiene por objeto identificar con grandes ampliaciones la forma de las fibras, centrándose principalmente en su tamaño así como en la existencia de aglomeraciones. Ambos factores detallados, influyen notablemente en la mezcla correcta de las fibras con los áridos y el betún. Por lo tanto, el microscopio electrónico de barrido proporcionó la información física suficiente para evaluar la aptitud de las fibras para su homogenización dentro de la mezcla bituminosa y, en consecuencia, la mayor retención de betún y la eliminación de exudaciones de la mezcla bituminosa. La Figura 5.1 muestra la imagen de las fibras de celulosa obtenidas con microscopio electrónico de barrido.

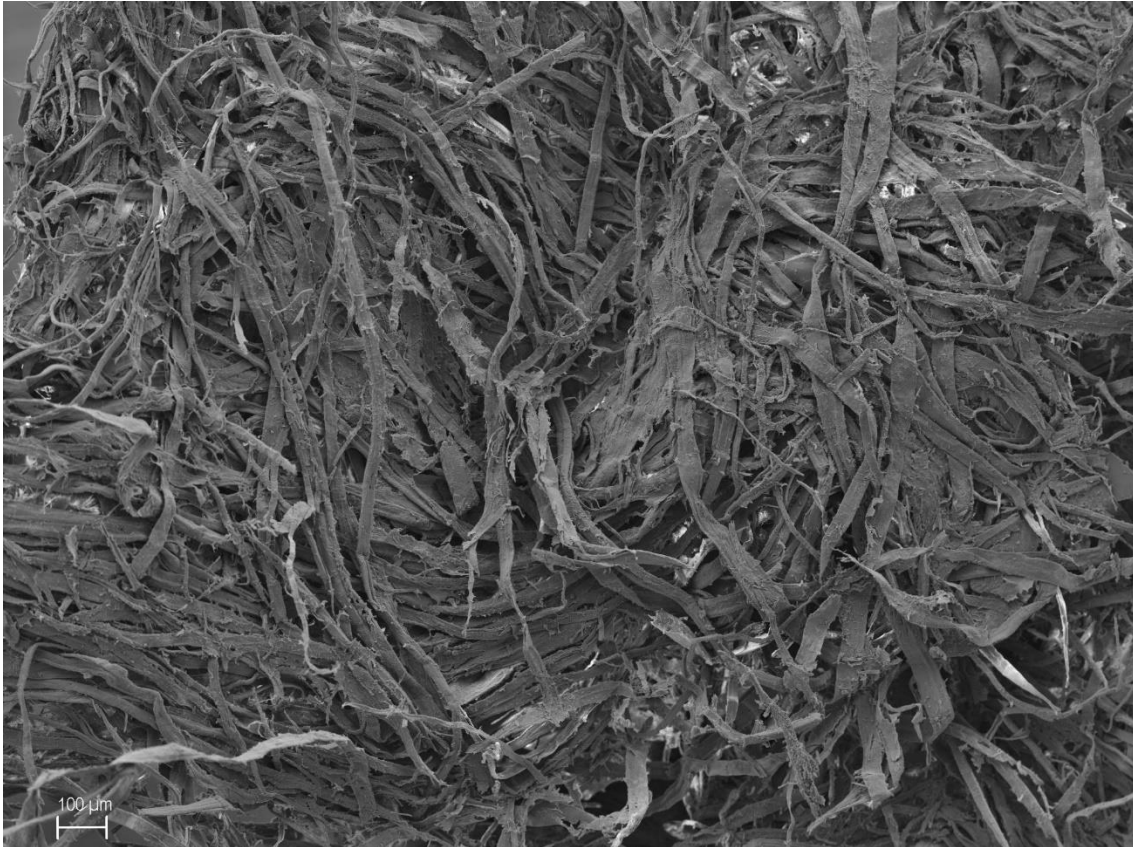


Figura 5.1. Imagen de las fibras de celulosa de la Industria Papelera obtenida con el Microscopio Electrónico de Barrido en la opción secundarios

Como puede observarse en la Figura 5.1, las fibras de celulosa analizadas poseen unas dimensiones milimétricas, no existiendo aglomeraciones de las mismas que pudieran perjudicar su distribución homogénea en la mezcla bituminosa. Por lo tanto, se consideran que son aptas para su utilización.

5.2. Conformado de las diferentes mezclas bituminosas con escorias de horno de arco eléctrico y escorias de horno cuchara.

Una vez evaluadas las características físicas, químicas y mecánicas de los subproductos industriales se procedió a conformar las diversas mezclas bituminosas detalladas en la metodología y según los ensayos característicos de cada tipo de mezcla. Los resultados de estos test se muestran a continuación, así como la discusión de los valores obtenidos.

5.2.1. Firmes reciclado in situ con emulsión bituminosa y escorias de horno cuchara

Las mezclas bituminosas de firmes reciclados in situ con emulsión bituminosa comprenden una serie de etapas para su desarrollo como se ha detallado en la metodología. A continuación se muestran los resultados de los ensayos lógicamente ordenados y la discusión de los valores obtenidos, existiendo por lo tanto en todo el proceso un control continuo de los datos y una retroalimentación de resultados para conseguir las mejores propiedades de la mezcla bituminosa conformada.

5.2.1.1. Determinación de la curva granulométrica con la combinación de escorias de horno cuchara y firme reciclado. Determinación de la granulometría de las partículas (UNE-EN 933-1:2012)

Primeramente, el firme fresado ha sido caracterizado granulométricamente para el estudio de su curva granulométrica y así poder ajustar el porcentaje de escorias blancas a adicionar que cumple con el huso granulométrico marcado por la normativa. La granulométrica es la que se muestra en la Tabla 5.11, así como en el Gráfico 5.2, en el cual puede observarse la granulometría del firme fresado en correspondencia con el huso RE2 marcado por la Orden Circular 8/2001.

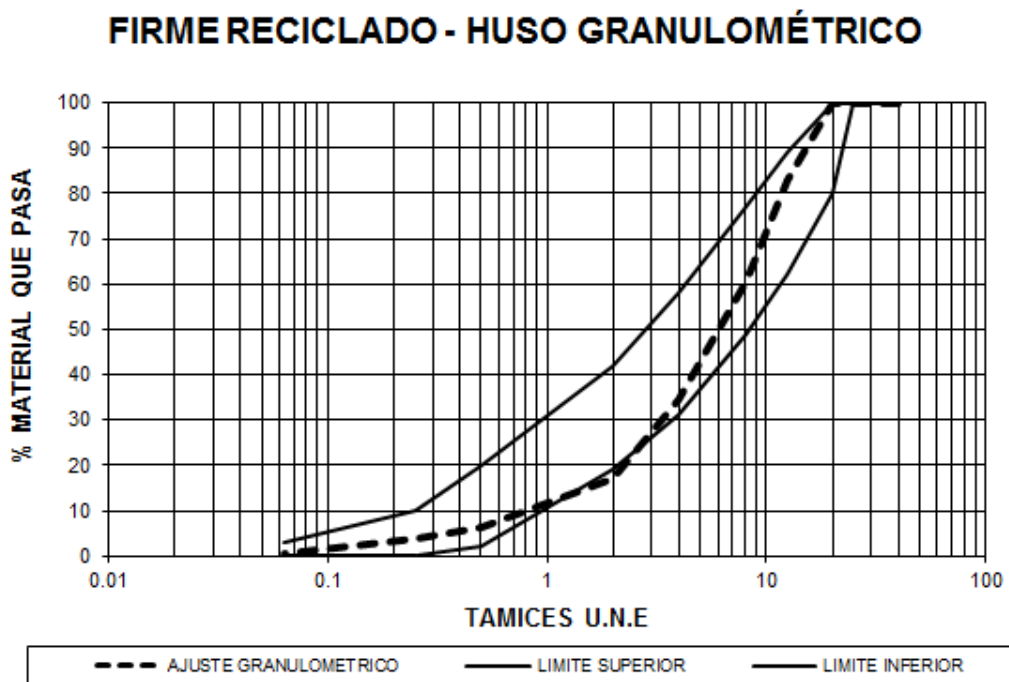


Figura 5.2. Curva granulométrica del firme fresado referenciado al huso granulométrico RE2 de la Orden Circular 8/2001.

Firme fresado	100,0	100,0	100,0	82,9	60,5	34,4	17,1	6,1	4,0	0,5
Lim.sup	100	100	100	89	77	58	42	20	10	3
Lim.inf	100	100	80	62	49	31	19	2	0	0
Tamices une	40	25	20	12,5	8	4	2	0,5	0,25	0,063

Tabla 5.11. Curva granulométrica del firme fresado referenciado al huso granulométrico RE2 de la Orden Circular 8/2001.

Como se puede observar en el Gráfico 5.2, la curva granulométrica del firme fresado refleja una composición mayoritaria de árido grueso, siendo su tamaño mayor menor de 25 mm. A su vez, la baja proporción de finos ocasionó la adición de escorias blancas para ajustar la curva granulométrica a los husos establecidos, así como para poner de manifiesto sus características cementosas.

Por la otra parte, se analizó la granulometría de las escorias blancas, dentro de los ensayos físicos, siendo esta la que se observa en la Gráfica 5.3 y en la Tabla 5.12.

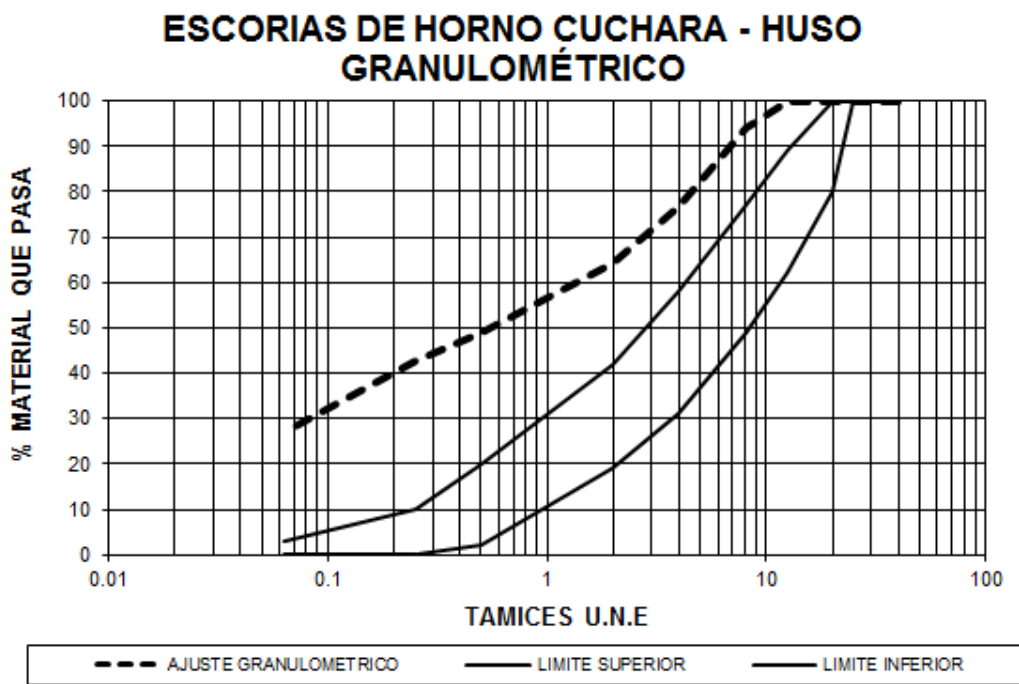


Figura 5.3. Curva granulométrica de las escorias blancas referenciadas al huso granulométrico RE2 de la Orden Circular 8/2001.

Escorias blancas	100,0	100,0	100,0	100,0	94,2	76,5	64,2	49,1	42,9	26,8
Lim.sup	100	100	100	89	77	58	42	20	10	3
Lim.inf	100	100	80	62	49	31	19	2	0	0
Tamices une	40	25	20	12,5	8	4	2	0,5	0,25	0,063

Tabla 5.12. Curva granulométrica de las escorias blancas referenciadas al huso granulométrico RE2 de la Orden

Circular 8/2001.

Puede observarse como existe un porcentaje importante de fino así como en menor proporción de áridos gruesos, reflejando un tamaño máximo de árido de 12,5 mm. Por lo tanto, la granulometría de las escorias de horno cuchara es ideal para la corrección granulométrica del firme reciclado.

En base a la granulometría del firme fresado y las escorias blancas se procedió a calcular el porcentaje de adición de cada uno de los elementos con el fin de corroborar el uso granulométrico marcado por la Orden Circular 8/2001, así como para incorporar un porcentaje adecuado de escoria blanca tal que ponga de manifiesto sus características cementosas, y en consecuencia, resistentes. El porcentaje de combinación de ambos elementos es 90% de firme fresado y 10% de escorias blancas, siendo por lo tanto elegido este porcentaje en función del ajuste detallado. En el Gráfico 5.4 y Tabla 5.13 puede observarse la curva granulométrica correspondiente a la mezcla de ambos materiales. Mencionar que en los sucesivos apartados cuando se hable de árido se referirá de la combinación de ambos materiales en los porcentajes detallados y que, por lo tanto, los porcentajes de emulsión y agua están referidos sobre la masa de ambos en conjunción.

FIRME RECICLADO - HUSO GRANULOMÉTRICO

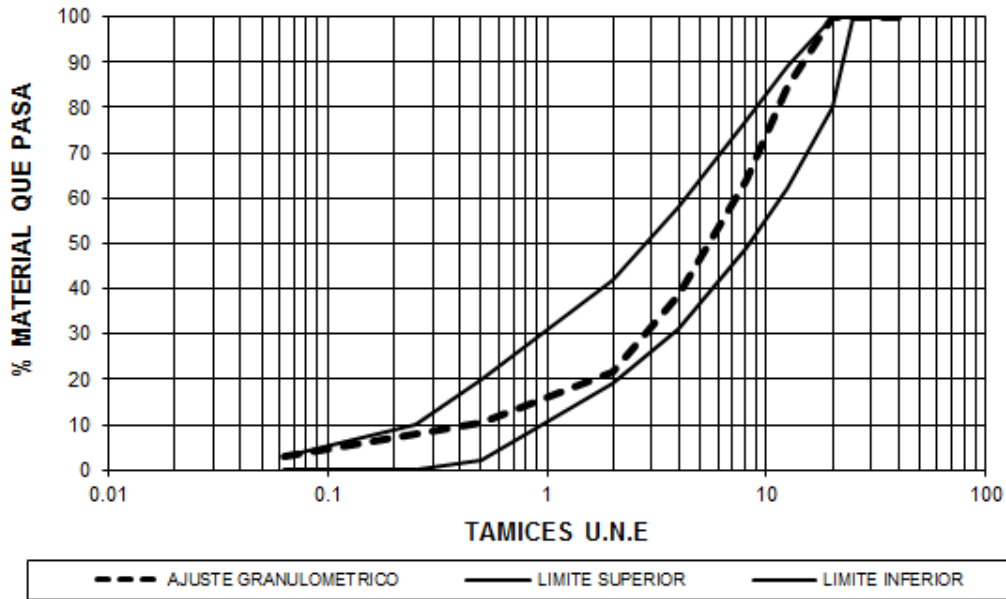


Figura 5.4. Curva granulométrica combinación firme fresado 90% y escorias blancas 10% referenciadas al huso granulométrico RE2 de la Orden Circular 8/2001.

Firme fresado 90% + escorias blancas 10%	100,0	100,0	100,0	100,0	94,2	76,5	64,2	49,1	42,9	26,8
Lim.sup	100	100	100	89	77	58	42	20	10	3
Lim.inf	100	100	80	62	49	31	19	2	0	0
Tamices une	40	25	20	12,5	8	4	2	0,5	0,25	0,063

Tabla 5.13. Curva granulométrica combinación firme fresado 90% y escorias blancas 10% referenciadas al huso granulométrico RE2 de la Orden Circular 8/2001.

5.2.1.2. Ensayo Proctor Modificado (UNE 103501:1994)

Determinada el porcentaje de combinación de ambos materiales se procede a la realización del ensayo Proctor Modificado UNE 103501 para la determinación de la humedad óptima que propicia la densidad máxima de compactación. Esta humedad óptima es también denominada como Contenido Teórico de Fluidos (CTF), y correspondería al agua de preenvuelta mas emulsión.

El ensayo Proctor Modificado se realizó para porcentajes de agua de 0%, 2,5%, 5%, 7,5% y 10% sobre la masa de árido, compuesta por la combinación de escorias de horno cuchara y firmes reciclados en un 10 % y un 90 % respectivamente. Los resultados de este ensayo pueden observarse en la Tabla 5.14 y la Figura 5.5.

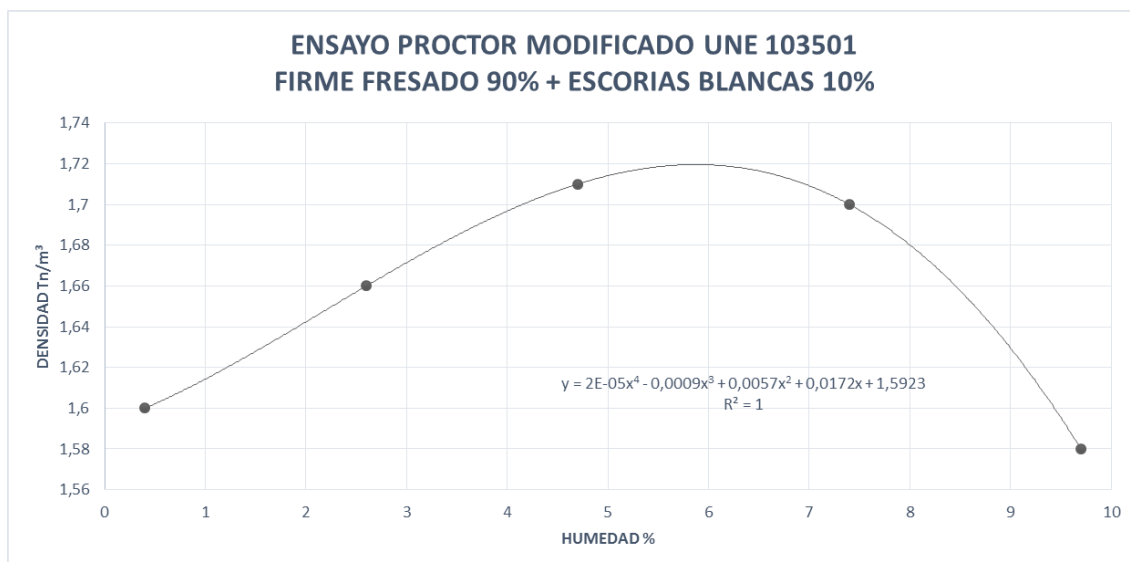


Figura 5.5. Ensayos Proctor Modificado UNE 103501 para el 90% del firme fresado y el 10% de escorias blancas

Humedad, %	0,4	2,6	4,7	7,4	9,7
Densidad, Tn/m ³	1,60	1,66	1,71	1,70	1,58

Tabla 5.14. Ensayos Proctor Modificado UNE 103501 para el 90% del firme fresado y el 10% de escorias blancas y diferentes porcentajes de humedad.

El ensayo Proctor Modificado refleja un claro valor máximo de densidad en la gráfica representada, por lo que se procedió a la obtención del porcentaje de agua que propicia esa mayor densidad. Para ello se aproximó una función polinómica para los 5 puntos obtenidos y se calculó el máximo de esta función. Este cálculo reflejó que la densidad máxima seca que se podría obtener era de 1,72 Tn/m³, con una humedad óptima correspondiente de 5,9%. Este porcentaje de humedad óptima es el que se fija como Contenido Teórico de Fluidos (CTF)

5.2.1.3. Envuelta y resistencia al desplazamiento por agua de las emulsiones bituminosas (NLT-196/84)

Determinado el Contenido Teórico de Fluidos (5,9% sobre árido) se calculó el Contenido Óptimo de Fluidos (COF), partiendo como ensayo esencial para determinarlo del ensayo de envuelta NLT-196/84. Se fijó un porcentaje de emulsión del 3% sobre árido (firme reciclado más escorias blancas) y porcentajes crecientes de agua de preenvuelta desde el CTF-2% al CTF, es decir, 0,9%, 1,9% y 2,9% de agua sobre árido.

Las imágenes de la adhesión de la emulsión con el árido en seco y tras sumergir se observan en la Ilustración 5.6.

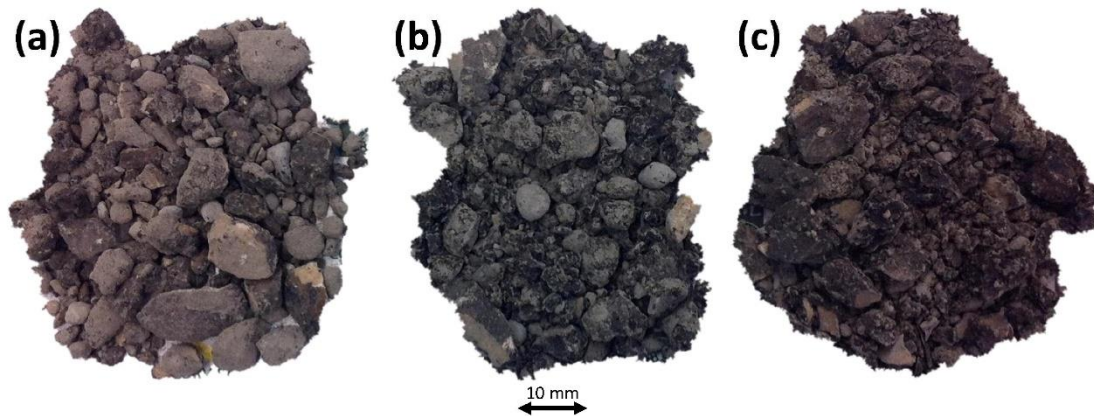


Figura 5.6. Ensayo de Envuelta NLT-196/84 para firme fresado, escorias blancas y 3% de emulsión con diferentes porcentajes de agua de preenvuelta. (a) 0,9% de agua sobre árido, (b) 1,9% de agua sobre árido y (c) 2,9% de agua sobre árido.

La observación de los ensayos de envuelta manifiesta una mejor adherencia y envuelta de la emulsión, clasificándola como buena, en la mezcla con un 2,9% de agua de preenvuelta y un 3% de emulsión sobre árido. Es fácilmente observable su buen comportamiento, por lo que será por lo tanto este porcentaje de agua el evaluado como Contenido Óptimo de Fluidos, coincidiendo en este caso con el Contenido Teórico de Fluidos. Caben destacar que los tiempos de envuelta han sido inferiores a 60 segundos, así como tiempos de rotura de la emulsión menores a 300 segundos, es por lo tanto, una prueba fehaciente de la compatibilidad de la emulsión con el árido.

5.2.1.4. Conformado de las diferentes familias de mezclas bituminosas. Resistencia a compresión simple de mezclas bituminosas (NLT-161/98)

Determinado el Contenido Óptimo de Fluidos se procede a fabricar las diferentes familias de probetas con porcentajes crecientes de emulsión. La Orden Circular 8/2001 marca un porcentaje de emulsión para firmes reciclados in situ comprendido entre el 2,5% y el 4% sobre el árido, por lo tanto y con el fin de cubrir todo el rango posible de combinaciones, se realizaron tres familias con porcentajes crecientes de emulsión de 0,5% desde el 3% al 4% de emulsión sobre árido. Se desechó el porcentaje de emulsión de 2,5% al suponer que con la gran cantidad de finos presentes por la adición de escorias blancas este porcentaje de emulsión sería insuficiente. A su vez, el agua de preenvuelta para cada una de las familias se calculó como la diferencia entre el Contenido Óptimo de Fluidos (COF) y el porcentaje de emulsión correspondiente. Los porcentajes de

adición de agua de preenvuelta y emulsión para a cada una de las familias son los que se detallan en la Tabla 5.15.

Grupo	1	2	3
Agua preenvuelta, % sobre árido	2,9	2,4	1,9
Emulsión, % sobre árido	3	3,5	4

Tabla 5.15. Grupo de probetas fabricadas con diferentes porcentajes de emulsión y agua de preenvuelta sobre árido.

En total se fabricaron 12 probetas de cada grupo según la norma NLT161/98 para, tras su curado hasta masa constante a la temperatura de $50 \pm 2^\circ\text{C}$ en estufa de aire forzado, proceder a la realización de los ensayos físicos.

5.2.1.5. Determinación de la densidad máxima (UNE-EN 12697-5:2020)

Las probetas conformadas de cada familia y tras el proceso de curado, fueron sometidas a los ensayos físicos esenciales y señalados en la metodología. El primero de ellos es el cálculo de la densidad máxima de las probetas. Los resultados de este ensayo vienen reflejados en la Figura 5.7. y en la Tabla 5.16.

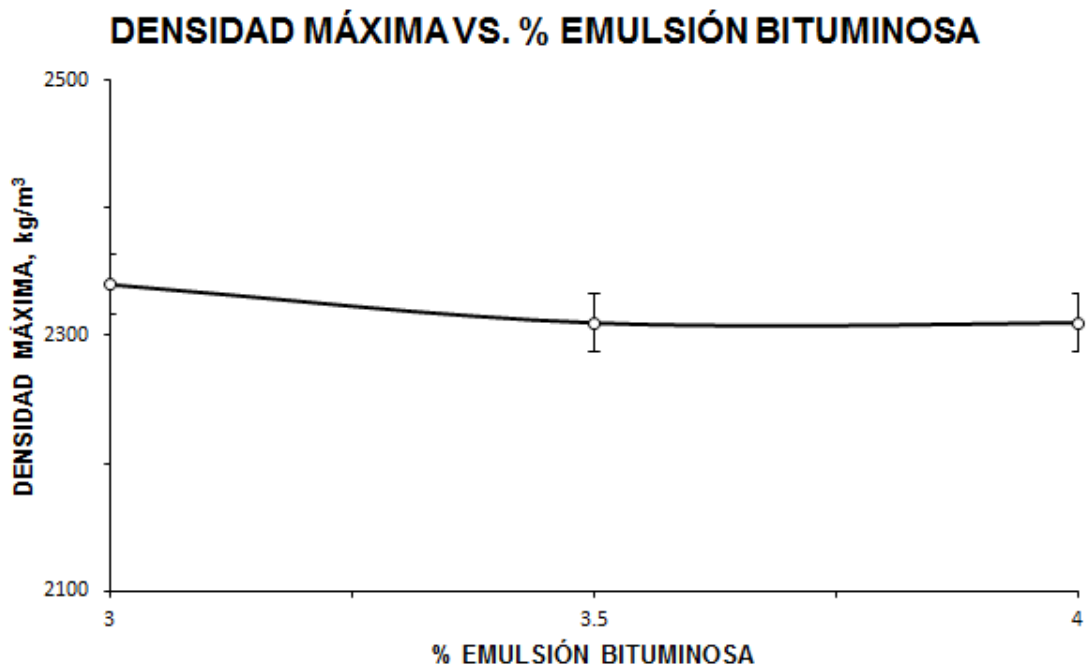


Figura 5.7. Gráfico de la densidad máxima de las diferentes familias de probetas conformadas con firme reciclado, escorias de horno cuchara y diferentes porcentajes de emulsión bituminosa.

Ensayo	Norma	1	2	3
Densidad máxima, kg/m ³	UNE-EN 12697-5	2340 ± 40	2310 ± 30	2310 ± 80

Tabla 5.16. Densidad máxima de las diferentes familias de probetas conformadas con firme reciclado, escorias de horno cuchara y diferentes porcentajes de emulsión bituminosa.

Como puede observarse en el Gráfico y en la Tabla anterior, la densidad máxima disminuye levemente con el aumento del porcentaje de emulsión bituminosa, hecho esperable si se tiene en cuenta la menor densidad de la emulsión. No obstante, las variaciones son pequeñas.

5.2.1.6. Determinación de la densidad aparente (UNE-EN 12697-6:2012)

La densidad aparente calculada por el método hidrostático para las diferentes familias de probetas con porcentajes crecientes de emulsión bituminosa y con árido formado por firme reciclado y escorias de horno cuchara se representan en a Figura 5.8. y la Tabla 5.17.

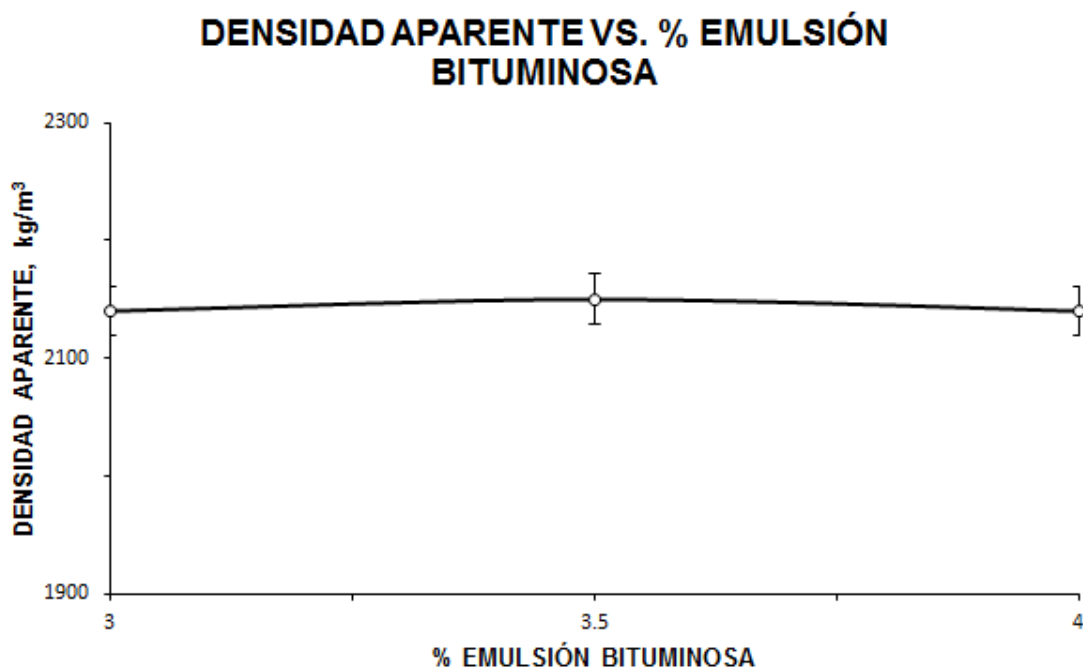


Figura 5.8. Gráfico de la densidad aparente de las diferentes familias de probetas conformadas con firme reciclado, escorias de horno cuchara y diferentes porcentajes de emulsión bituminosa.

Ensayo	Norma	1	2	3
Densidad aparente, t/m ³	UNE-EN 12697-6	2140 ± 80	2150 ± 70	2140 ± 40

Tabla 5.17. Densidad aparente de las diferentes familias de probetas conformadas con firme reciclado, escorias de horno cuchara y diferentes porcentajes de emulsión bituminosa.

La densidad aparente para las familias de mezclas bituminosas conformadas parece obtener resultados similares entre ellas e independientes del porcentaje de emulsión bituminosa. No se aprecian cambios considerables en la densidad aparente de las mezclas.

5.2.1.7. Determinación del contenido de huecos (UNE-EN 12697-8:2020)

El contenido de huecos o índice de huecos en mezcla fue calculado a partir de los valores de densidad máxima y aparente para cada una de las familias de mezclas, basándose en los resultados obtenidos de todas las probetas ensayadas. Este contenido de huecos en mezcla se representa en la Figura 5.9. y en la Tabla 5.18.

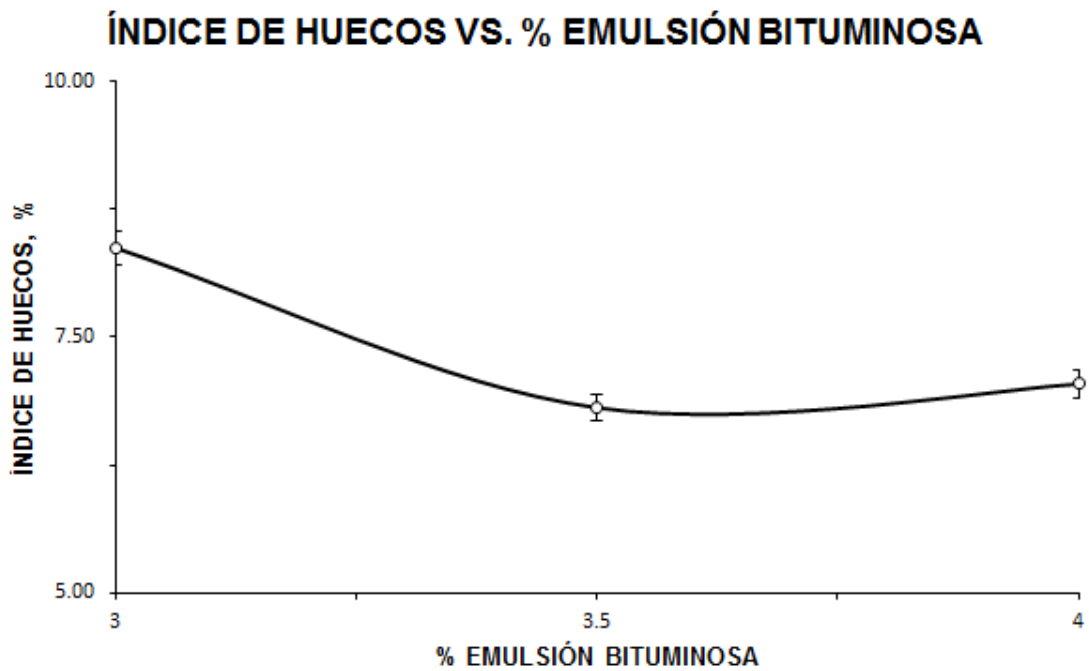


Figura 5.9. Gráfico del índice de huecos de las diferentes familias de probetas conformadas con firme reciclado, escorias de horno cuchara y diferentes porcentajes de emulsión bituminosa.

Ensayo	Norma	1	2	3
Índice de huecos, %	UNE-EN 12697-8	8,37 ± 0,31	6,81 ± 0,15	7,04 ± 0,25

Tabla 5.18. Índice de huecos de las diferentes familias de probetas conformadas con firme reciclado, escorias de horno cuchara y diferentes porcentajes de emulsión bituminosa.

El gráfico anterior refleja como el índice de huecos disminuye con el aumento del porcentaje de emulsión bituminosa sobre árido, mostrando un leve ascenso en la última

familia. Cabe destacar el menor índice de huecos de las mezclas conformadas con un 3,5 % de emulsión bituminosa, representando con alta probabilidad una mayor resistencia a compresión simple en los entornos de ese porcentaje. El contenido de huecos en mezcla para todas las mezclas bituminosas es adecuado, no siendo excesivo ni extremadamente bajo, evitando por lo tanto producir posteriores problemas de deformaciones indeseadas.

5.2.1.8. Ensayo de Inmersión – Compresión (NLT-162/00)

Realizados los ensayos físicos para todas las probetas de cada familia de mezclas bituminosa se procedió a subdividir cada familia en dos grupos de forma aleatoria. Los diferentes grupos de cada familia han sido sometidos a condiciones diferentes, principalmente un grupo a condiciones de inmersión en agua y otro no. De esta forma es posible valorar el efecto del agua sobre la cohesión de la mezcla bituminosa. Posteriormente, se realizó el ensayo de resistencia a compresión simple según la normativa realizada y se valoraron los resultados obtenidos. Los resultados mencionados aparecen en la Figura 5.10. y en la Tabla 5.19.

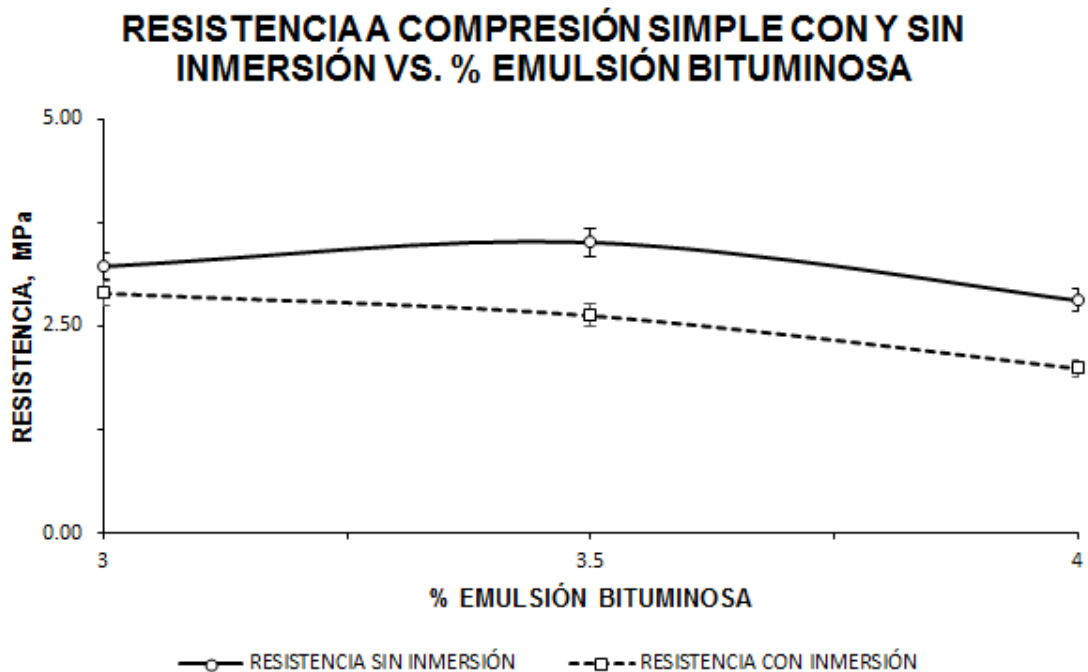


Figura 5.10. Gráfico de resistencia a compresión simple con y sin inmersión de las diferentes familias de probetas conformadas con firme reciclado, escorias de horno cuchara y diferentes porcentajes de emulsión bituminosa.

Ensayo	Norma	1	2	3
Resistencia a compresion simple sin inmersión, MPa	NLT-162/00	3,22 ± 0,12	3,51 ± 0,12	2,81 ± 0,09
Resistencia a compresion simple con inmersión, MPa	NLT-162/00	2,90 ± 0,04	2,63 ± 0,03	1,99 ± 0,03
Índice de resistencia conservada, %	NLT-162/00	90 ± 2	75 ± 2	71 ± 1

Tabla 5.19. Resistencia a compresión simple con y sin inmersión de las diferentes familias de probetas conformadas con firme reciclado, escorias de horno cuchara y diferentes porcentajes de emulsión bituminosa.

En base a la resistencia en seco cabe destacar la existencia de un punto óptimo comprendido entre el 3 y 3,5% de emulsión sobre árido, así como una decreciente resistencia tras inmersión con un mayor porcentaje de emulsión. Por otra parte, se observa una clara disminución de la resistencia tras la inmersión en agua con el incremento del porcentaje de emulsión bituminosa, hasta la familia con un 4 % de emulsión sobre árido. Este hecho se debe fundamentalmente a la influencia de la emulsión bituminosa en las características de la mezclas realizadas, mostrando poca variación entre la resistencia con y sin inmersión en las familias con reducido porcentaje de emulsión. Por lo tanto, y partiendo de los valores mínimos expuestos por la normativa española de 3 MPa de resistencia en seco y 2,5 MPa de resistencia en húmedo, son aceptables en principio los valores del 3 % de emulsión y 2,9 % de agua de preenvuelta, así como el 3,5% de emulsión y el 2,4% de agua de preenvuelta sobre árido.

5.2.1.9. Fórmula óptima de trabajo

Una vez evaluadas las diferentes familias de probetas se procede a calcular matemáticamente, en función de la resistencia en seco y con los puntos obtenidos de las diferentes familias, el porcentaje de emulsión que ocasionaría la máxima resistencia. El máximo de esta función, ilustrada en la Figura 5.11., coincide con un 3,3% de emulsión sobre árido y un 2,6% de agua de preenvuelta.

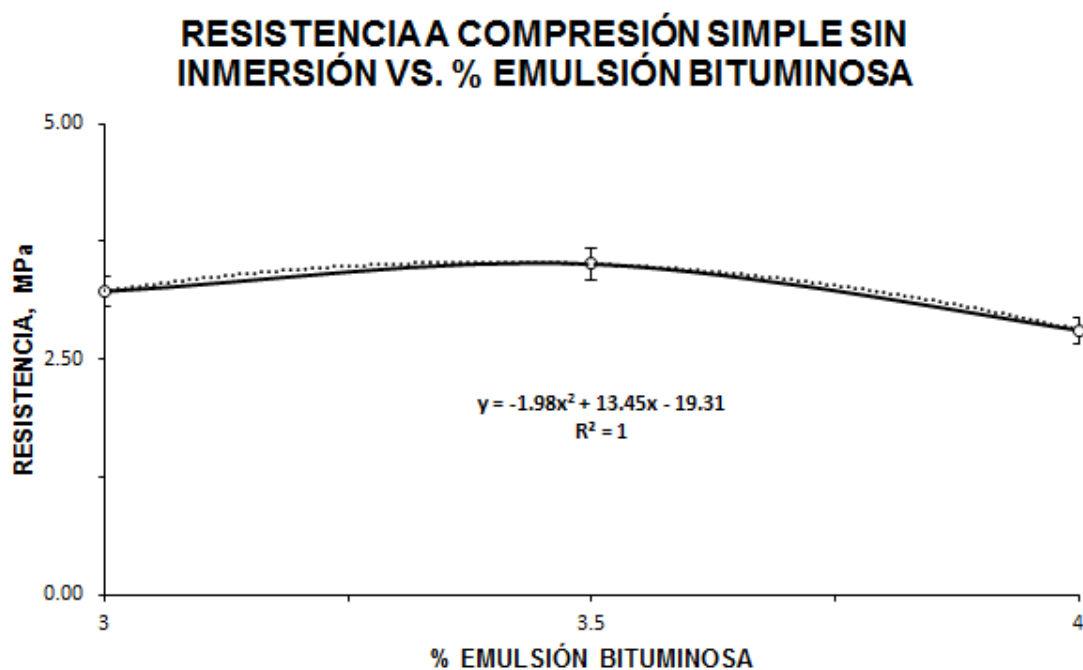


Figura 5.11. Cálculo de la fórmula óptima de trabajo en función del ensayo de resistencia a compresión simple en seco NLT-162/00 para los diferentes porcentajes de emulsión de cada familia de probetas.

Cabe destacar que el fijarse el óptimo de combinación de materiales a partir del ensayo de resistencia a compresión simple en seco está justificado por las características de la mezcla realizada, ya que este tipo de mezcla cumple fundamentalmente una función resistente y debe por lo tanto proporcionar las características óptimas según esta cualidad. No obstante, y como es obvio, se seleccionó el porcentaje de emulsión bituminosa y agua de preenvuelta correspondiente al que propicia el máximo de resistencia a compresión simple en seco porque a su vez cumplía con todas las restricciones marcadas por la normativa respecto a las otras propiedades, ya sean físicas o de resistencia a compresión tras inmersión. Si no fuera así, se tomaría un porcentaje de emulsión en el entorno al punto de máxima resistencia que cumpliera con todas las restricciones.

Con el máximo obtenido matemáticamente y los porcentajes de adición de las diferentes materiales se procede a fabricar 12 probetas para la corroboración de las propiedades óptimas con esta fórmula de trabajo.

El proceso de fabricación, curado y estudio de la afección del agua es similar al de las otras familias realizadas, siendo los resultados desprendidos del ensayo de esta fórmula óptima de trabajo los que se detallan en la Tabla 5.20.

Combinación óptima de materiales		
Ensayo	Norma	Valor
Agua preenvuelta, % sobre árido	-	2,6
Emulsion, % sobre árido	-	3,3
Densidad máxima, Tn/m ³	UNE-EN 12697-5	2,32 ± 0,07
Densidad aparente, Tn/m ³	UNE-EN 12697-6	2,15 ± 0,04
Índice de Huecos, %	UNE-EN 12697-8	7,30 ± 0,27
Resistencia en seco, MPa	NLT-162/00	3,65 ± 0,06
Resistencia sumergida, Mpa	NLT-162/00	2,91 ± 0,08
Índice de Resistencia Conservada, %	NLT-162/00	80 ± 2

Tabla 5.20. Combinación óptima de materiales para la realización de firmes reciclados in situ con emulsión bituminosa y resultados de los ensayos

La combinación de materiales del firme reciclado más escorias blancas en unos porcentajes de 90% y 10% respectivamente, más la adición de un 2,6 % de agua de preenvuelta y un 3,3% de emulsión ha reflejado unos resultados superiores a los de las restantes familias. Los valores de resistencia en seco y tras inmersión, así como de resistencia conservada, son mayores a los exigidos por la normativa al respecto. Los valores mínimos fijados por la Orden Circular 8/2001 son de 3 MPa para resistencia en seco y 2,5 MPa para resistencia tras inmersión, manteniendo en todo caso un Índice de Resistencia Conservada superior al 75 %.

Cabe destacar que en este tipo de técnica de firmes reciclados in situ con emulsión bituminosa se ha utilizado un alto porcentaje de firme reciclado. Este porcentaje del 90% de firme reciclado habría sido inaceptable en otras técnicas que no utilizaran emulsión bituminosa y que sólo utilicen betún (por ejemplo, mezclas asfálticas en caliente). Además, se ha comprobado que el porcentaje de firme reciclado y escorias de horno cuchara es adecuado, como se refleja en las pruebas de resistencia a la compresión. Estos resultados se obtuvieron gracias a sus propiedades cementantes y a la adición de escoria de horno de cuchara. Por último señalar que la emulsión catiónica de rotura lenta C60B5 REC presenta en combinación con las escorias de horno cuchara y el firme fresado una buena compatibilidad, como pudo observarse en el ensayo de envuelta. La adhesión de la emulsión al árido, su cohesión y los tiempos de rotura son adecuados para su uso con

las escorias y los firmes fresados, mostrándose máximos estos resultados para porcentajes de agua de preenvuelta del 2,9% sobre árido y emulsión del 3% sobre árido.

En definitiva, puede afirmarse que las escorias de horno cuchara poseen buenas características para la fabricación de firmes reciclados in situ con emulsión bituminosa, consiguiendo gracias a su composición y forma ajustar granulométricamente el firme fresado, así como proporcionar características de resistencia adecuadas a corto y largo plazo.

5.2.2. Asfalto poroso con emulsión bituminosa, escorias de horno de arco eléctrico y fibras de celulosa desechadas de la industria papelera

La mezcla desarrollada es una mezcla de granulometría discontinua con emulsión bituminosa. La curva granulométrica adoptada posee una composición intermedia entre el huso superior e inferior para el árido grueso. Por otra parte, y con el fin de mejorar la vida útil de la mezcla y la resistencia a tracción, así como hacer posible la absorción de porcentajes crecientes de betún, se aumentó levemente la proporción de árido fino con respecto a la curva intermedia comprendida entre el huso granulométrico superior e inferior. El huso granulométrico para esta mezcla de granulometría discontinua de tamaño máximo de árido de 12 mm viene detallado en la normativa española, como se mencionó en la metodología.

Con la granulometría detallada en la metodología conformada con escorias de horno de arco eléctrico como árido grueso, árido fino y filler, así como con la emulsión bituminosa catiónica media y las fibras de celulosas desechadas de la industria papelera, se procede a realizar los siguientes ensayos mencionados en la metodología para la obtención de la combinación óptima de materiales. Esta combinación óptima de materiales es la que mejores propiedades mecánicas obtiene, manteniendo siempre resultados aceptables en las demás propiedades.

5.2.2.1. Determinación de la adhesividad de las emulsiones bituminosas por inmersión en agua (UNE-EN 13614)

Este ensayo distingue dos tipos de adhesividades; una denominada adhesividad inmediata y correspondiente a la envuelta del árido con la emulsión bituminosa; y otra,

la adhesión árido - betún estudiando la envuelta del árido por el betún tras el proceso de curado y un periodo de 24 horas en agua a la temperatura de 60 ± 1 °C. Ambos valores son medidos cuantitativamente expresando el porcentaje de envuelta de las escorias por el betún al final del ensayo.

La emulsión utilizada para este ensayo y evaluada para su utilización en mezclas bituminosas es una emulsión catiónica de rotura media, más concretamente y según la normativa europea C67BF3 MBA.

En la Figura 5.12 se representa la imagen de las escorias negras tras el ensayo de adhesividad inmediata con la emulsión mencionada y la imagen de la adhesión árido - betún. El resultado del ensayo de adhesividad se muestra en la Tabla 5.21.

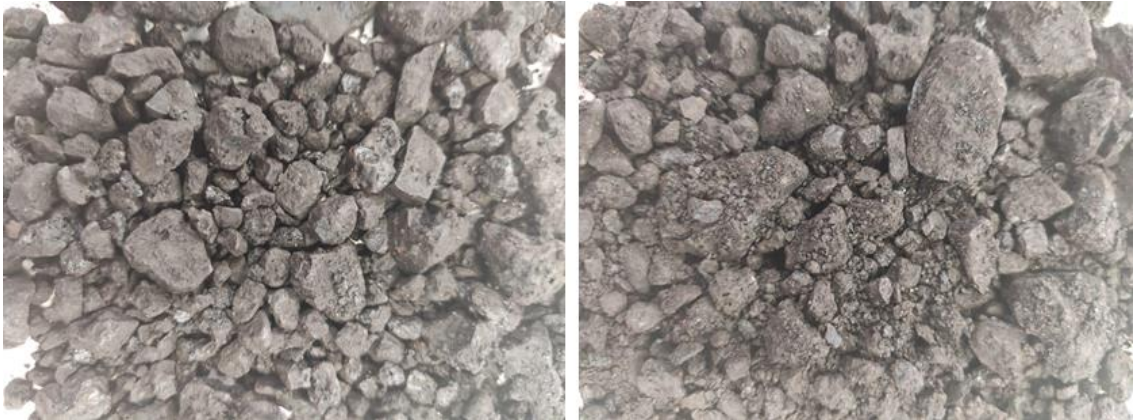


Figura 5.12. Ensayo de adhesión de las escorias negras y la emulsión bituminosa C67BF3 MBA. Adhesividad inmediata emulsión - escorias negras (Izquierda). Adhesión escorias negras - betún (Derecha).

Ensayo de adhesividad	Valor, %
% De adhesión de las escorias con la emulsión. Adhesividad inmediata.	100
% De adhesión de las escorias con el betún. Adhesión árido - betún	100

Tabla 5.21. Ensayo de adhesión de las escorias negras y la emulsión bituminosa C67BF3 MBA.

Ambas adhesividades reflejan un comportamiento excelente de la emulsión en conjugación con las escorias de horno de arco eléctrico, siendo por lo tanto adecuado el uso de esta emulsión para las mezclas bituminosas estudiadas.

5.2.2.2. Preparación de probetas mediante compactador de impactos (UNE-EN 12697-30:2019)

Un árido convencional la densidad es aproximadamente 2650 kg/m³, no obstante, las escorias negras poseen una densidad que difiere de este valor. Por lo tanto, se realizaron las correcciones volumétricas oportunas para no adicionar emulsión en exceso con respecto al árido. Las correcciones de densidad son las que se detallan en la Tabla 5.22, mostrando también la masa necesaria de escorias negras de cada fracción granulométrica para la conformación de probetas tipo Marshall con la curva granulométrica establecida.

Tamiz	% pasa	% masa	Masa por tamaño de partícula, g	Densidad EAFS, kg/m ³	Masa de EAFS por fracción granulométrica, g
20	100,0	0,0	0	-	0
12,5	72,5	27,5	275	3124	324
8	42,5	30,0	300	3199	362
4	15,0	27,5	275	3356	348
2	4,0	11,0	110	3356	139
0,063	1,5	2,5	25	3390	32
Filler	0,0	1,5	15	3076	17
Total	-	100,0	1000	-	1223

Tabla 5.22. Composición de la curva granulométrica de escorias negras para la fabricación de una probeta del tipo Marshall.

Se observa que las probetas de escorias obtuvieron una masa de 1223 gramos, para la obtención de una probeta similar que utilice árido convencional, de 1000 gramos. Este hecho debe tenerse en cuenta no solo en la dosificación del árido, sino en la dosificación de la emulsión y las fibras que estará referida a la masa de una probeta de árido convencional, es decir, a la densidad de 2650 kg/m³.

Por otra parte, para el cálculo del porcentaje de emulsión necesario para la mezcla AF12 sin fibras de celulosa se utilizó la fórmula proporcionada por ATEB y mencionada en la metodología.

Al aplicar esta fórmula teniendo en cuenta un factor K de 0.1 y los valores de la Tabla 5.22. para los demás coeficientes, se obtiene un porcentaje de betún del 3,6% sobre árido. Por lo tanto, debe calcularse el porcentaje de emulsión sobre árido. Al representar el betún un 60 % de la emulsión, como figura en la ficha técnica de la emulsión, el

porcentaje de emulsión es de un 6 % sobre árido. La mezcla con este porcentaje de emulsión y la curva granulométrica detallada fue la inicial para el estudio.

Cabe destacar que el objetivo de esta investigación es el desarrollo de una mezcla con mayor porcentaje de betún debido a la incorporación de fibras. A su vez, las escorias de horno de arco eléctrico poseen un coeficiente de absorción mayor al de un árido convencional. Por lo tanto, se realizaron probetas sin la adición de fibras con porcentajes creciente 0.5 % de betún hasta observar exudación durante el proceso de curado. El porcentaje de betún, y en consecuencia de emulsión bituminosa, que propició exudaciones fue el porcentaje inicial para el estudio de las mezclas bituminosas con fibras. Por lo tanto, se corroboró la aptitud de las mismas, al no producirse exudación para ese porcentaje cuando se adicionaban las fibras de celulosa, y se desarrollaron mezclas con porcentajes crecientes de betún del 0.5 %. El porcentaje de emulsión se incrementó hasta que el tiempo de rotura de la mezcla en su fabricación fue inadecuado, la compactación era inaceptable o se produjeran exudaciones de betún durante el curado.

En base a lo comentado, las probetas sin fibras de celulosa con 8,3 % de emulsión y 5 % de betún produjeron exudación del betún durante el proceso de curado en estufa de dos días a 75 ± 2 °C y 5 días más a 90 ± 2 °C. Por lo tanto, este es el porcentaje de betún inicial para el estudio de las nuevas mezclas con la fibra de celulosa y porcentajes crecientes de betún del 0.5 %.

Para completar la información se definen los grupos de probetas que se fabricaron con la adición de fibras para la realización de los ensayos mencionados en la Tabla 5,23.

Familia	Emulsión, %	Betún, %
A12F5.0	8,3	5,0
A12F5.5	9,2	5,5
A12F6.0	10,0	6,0
A12F6.5	10,8	6,5
A12F7.0	11,7	7,0
A12F7.5	12,5	7,5

Tabla 5.23. Porcentajes de emulsión y betún para los grupos de probetas conformados de mezclas bituminosas con escorias negras y fibras.

Una vez determinado el porcentaje de emulsión de inicio se procede a fabricar las probetas con el 0,5 % de fibras y porcentajes crecientes del 0,5 % de betún sobre árido. El proceso de compactado y curado de las probetas fue el detallado anteriormente. Posteriormente, para cada grupo de probetas fabricadas se determinaron las propiedades físicas, siendo estas la densidad aparente, densidad máxima y el índice de huecos.

5.2.2.3. Determinación de la densidad máxima (UNE-EN 12697-5:2020)

La densidad máxima fue calculada para todas las probetas de las diversas familias de mezclas bituminosas conformadas. Los resultados de este ensayo y según el porcentaje de betún residual, se muestran en la Tabla 5.24 y en la Figura 5.13.

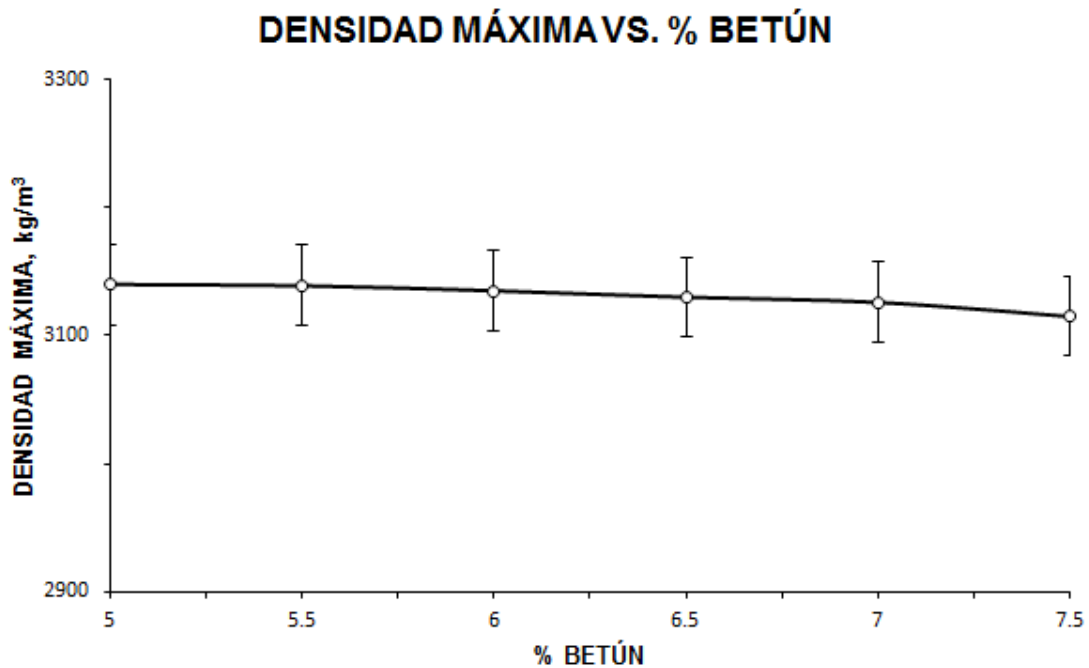


Figura 5.13. Gráfico de la densidad máxima de los grupos de muestras con escorias negras, emulsión bituminosa y fibras de celulosa.

Familia	Betun, %	Densidad máxima kg/m3
A12F5.0	5,0	3140 ± 64
A12F5.5	5,5	3139 ± 75
A12F6.0	6,0	3135 ± 130
A12F6.5	6,5	3130 ± 100
A12F7.0	7,0	3126 ± 127
A12F7.5	7,5	3115 ± 151

Tabla 5.24. Densidad máxima de los grupos de muestras con escorias negras, emulsión bituminosa y fibras de celulosa.

Como puede observarse, la densidad máxima de las probetas es anormalmente alta con respecto a las densidades de probetas de mezclas similares fabricadas con árido convencional. Este aumento de densidad es debido obviamente a la utilización de escorias negras para su conformación, no suponiendo en principio ningún problema pero si un detalle a tener en cuenta en su dosificación, almacenamiento y transporte. La densidad máxima disminuye con el aumento del porcentaje de betún, algo esperable al ser la densidad del betún mucho menor que la de las escorias negras.

5.2.2.4. Determinación de la densidad aparente (UNE-EN 12697-6:2012)

La densidad aparente de estas probetas se calculó por medio del método geométrico, reflejando los resultados que se muestran en la Tabla 5.25. y en la Figura 5.14..

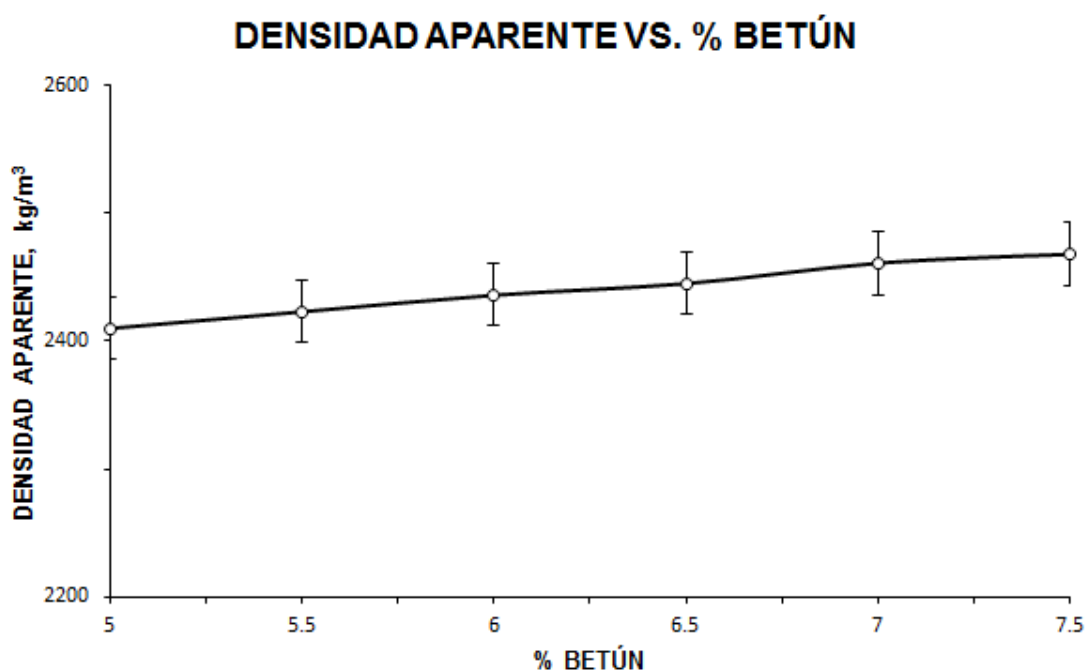


Figura 5.14. Gráfico de la densidad aparente de los grupos de muestras con escorias negras, emulsión bituminosa y fibras de celulosa.

Familia	Betun, %	Densidad aparente kg/m3
A12F5.0	5,0	2410 ± 103
A12F5.5	5,5	2423 ± 58
A12F6.0	6,0	2436 ± 91

A12F6.5	6,5	2445 ± 105
A12F7.0	7,0	2461 ± 87
A12F7.5	7,5	2468 ± 98

Tabla 5.25. Densidad aparente de los grupos de muestras con escorias negras, emulsión bituminosa y fibras de celulosa.

Como puede observarse, la densidad aparente va aumentando con el porcentaje de betún adicionado. Este hecho es debido principalmente a la mayor compactación que es posible con el porcentaje creciente de emulsión y ante una misma energía compactadora. Los resultados de este parámetro físico influyen en parámetros posteriores como el índice de huecos, e indirectamente, en las características resistentes.

5.2.2.5. Determinación del contenido de huecos (UNE-EN 12697-8:2020)

El índice de huecos en mezcla calculado a partir de la densidad máxima y la densidad aparente para cada familia, se muestra en la Tabla 5.26 y en la Figura 5.15..

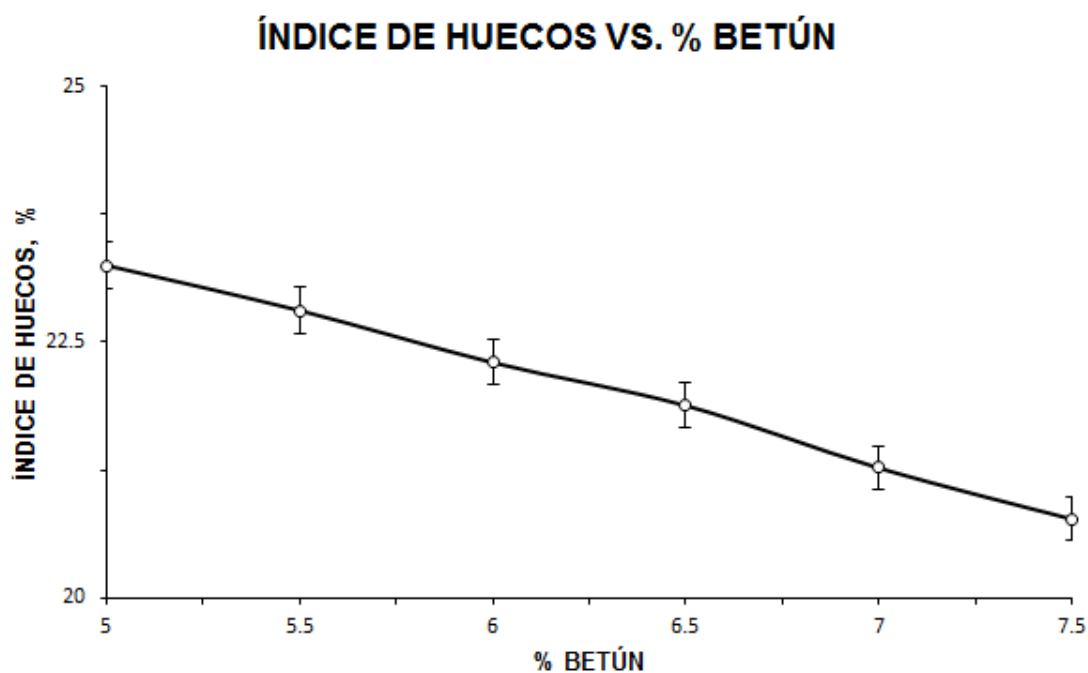


Figura 5.15. Gráfico de la densidad aparente de los grupos de muestras con escorias negras, emulsión bituminosa y fibras de celulosa.

Familia	Betun, %	Índice de huecos %
A12F5.0	5,0	23.25 ± 0.67
A12F5.5	5,5	22.81 ± 1.03
A12F6.0	6,0	22.30 ± 0.63
A12F6.5	6,5	21.88 ± 0.66

A12F7.0	7,0	21.27 ± 0.74
A12F7.5	7,5	20.77 ± 0.78

Tabla 5.26. Densidad aparente de los grupos de muestras con escorias negras, emulsión bituminosa y fibras de celulosa.

Los resultados del índice de huecos son elevados para todas las familias, siendo en todas ellas superior al 20 %. Este hecho, lejos de ser una desventaja, es una de las propiedades que perseguía el presente estudio, ya que un alto porcentaje de huecos en mezcla supone una mayor capacidad drenante del firme en periodos lluviosos, y a su vez, proporciona una macrotextura excelente. Esta macrotextura junto con la resistencia de las escorias negras confiere a la capa de rodadura una elevada seguridad. También el poseer un índice de huecos en mezcla elevado condiciona el confort de la carretera, ya que absorbe el ruido producido por el contacto entre neumático y pavimento. La desventaja de un mayor índice de huecos se deriva del posible colapso de la mezcla por ciclos de hielo y deshielo, o por la introducción en sus huecos de material arcilloso, es decir, problemas derivados por su pérdida de partículas y rotura. Esta desventaja usual en mezclas discontinuas con emulsión bituminosa se intenta corregir con un porcentaje mayor de betún proporcionado por las fibras de celulosa.

5.2.2.6. Pérdida de partículas de probetas de mezclas bituminosas drenantes (UNE-EN 12697-17:2018) y efecto del agua sobre la cohesión de mezclas bituminosas de granulometría abierta (NLT-362/92)

Una vez obtenidos los buenos resultados de sus propiedades físicas se evaluó la pérdida de partículas para, como se ha comentado, estudiar la afección de ese alto índice de huecos. El ensayo de pérdida de partículas es esencial en este tipo de mezclas para la caracterización de las mismas en servicio, evitando problemas derivados de fragmentación de la mezcla por el bajo contenido de finos. Es por lo tanto un ensayo a realizar a todo tipo de mezclas discontinuas, aún más a las mezclas drenantes. A su vez, y con el fin de estudiar perfectamente la adhesión del betún con el árido, así como el comportamiento de las diferentes mezclas ante condiciones adversas extrapolables a su vida útil. Se realizó también el ensayo de pérdida de partículas con una modificación sustancial en su procedimiento, la inmersión de las probetas en agua a 45 ± 1 °C durante 24 horas tras su curado y antes de ensayo. Esta modificación del ensayo viene

contemplada en la norma NLT-362/92 y permite evaluar con exactitud la adhesividad de la emulsión y el árido, así como la influencia de un porcentaje tan elevado de índice de huecos. Los valores de los resultados de los ensayos de las probetas de cada familia, tras su proceso de curado y para los ensayos de pérdida de partículas sin o con inmersión se detallan en la Tabla 5.27.

Familia	Betun, %	Pérdida de partículas, %	Pérdida de partículas tras inmersión, %
A12F5.0	5,0	80 ± 2	100 ± 2
A12F5.5	5,5	34 ± 1	60 ± 2
A12F6.0	6,0	22 ± 1	35 ± 2
A12F6.5	6,5	16 ± 1	20 ± 1
A12F7.0	7,0	12 ± 0	17 ± 1
A12F7.5	7,5	10 ± 0	15 ± 0

Tabla 5.27. Ensayo de pérdida de partículas con y sin inmersión de las probetas para todas las familias de mezclas bituminosas.

Los resultados de los ensayos de pérdida de partículas de la Tabla 5.27. son representados gráficamente en la Figura 5.16..

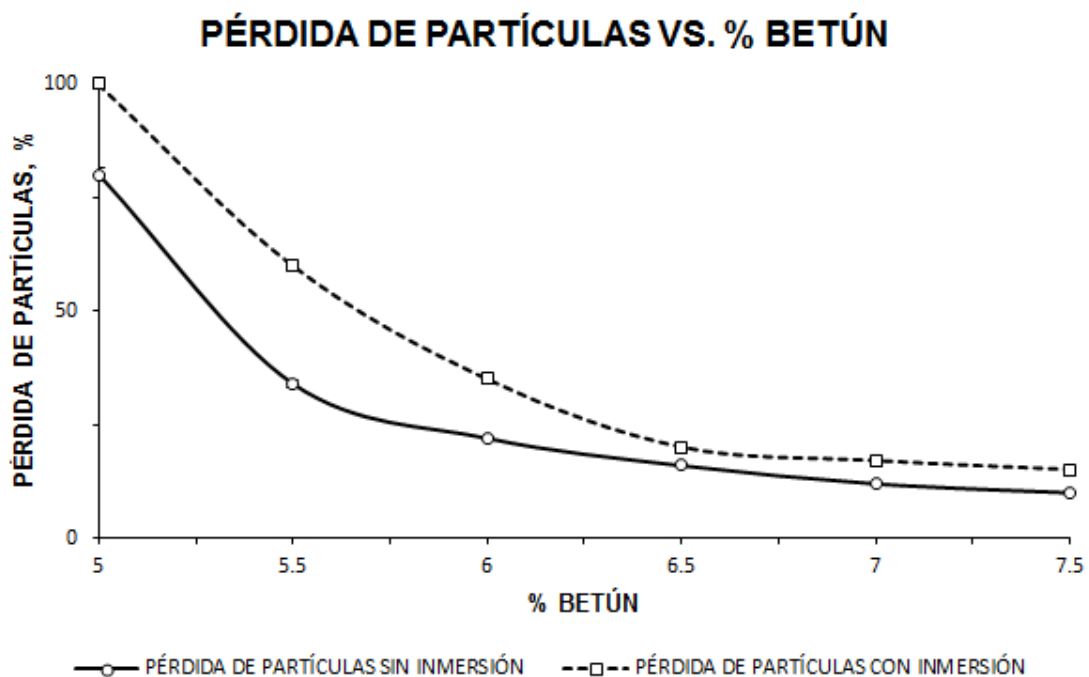


Figura 5.16. Grafico ensayo de pérdida de partículas con y sin inmersión de las probetas para todas las familias de mezclas bituminosas.

Los resultados del ensayo de pérdida de partículas sin inmersión reflejan una disminución importante de la pérdida por desgaste de las mezclas en seco con la adición

de porcentajes superiores de emulsión. Este hecho es lógico si pensamos que un mayor porcentaje de betún hará posible una mejor envuelta del árido y será capaz de soportar mejor las cargas externas.

Según lo establecido en la normativa española para este tipo de mezcla de granulometría discontinua, es aceptable valores de este ensayo menores al 25 %, obteniendo por lo tanto a partir de la familia A12F6.0, incluida, los resultados aceptables con un porcentaje de betún sobre árido del 6 % en adelante.

Por otra parte, el someter a las probetas de los diferentes grupos a las condiciones del ensayo de pérdida de partículas tras inmersión conlleva resultados peores que el ensayo de pérdida de partículas sin inmersión, siendo la pérdida mayor por este método en todas las familias de probetas. Si se toma como referencia lo establecido la normativa española y valorando la mezcla desde el lado de la seguridad, solo la familia A12F6.5, A12F7.0 y A12F7.5 son las que han producido resultados inferiores al 25 %, siendo estos porcentajes a los cuales se restringe el campo de actuación. En las familias señaladas como adecuadas, la diferencia entre la pérdida de partículas sin inmersión y tras inmersión es relativamente baja. Este hecho confirma la eficacia de las mezclas bituminosas obtenidas.

5.2.2.7. Ensayo Marshall (UNE-EN 12697-34:2013)

Finalmente y con el objetivo de caracterizar completamente la mezcla, se realizó en ensayo Marshall de todas las familias de probetas. Debe tenerse en cuenta que un aumento en el porcentaje de betún creará una mezcla que pierda menos partículas por desgaste, no obstante, un porcentaje mayor de betún puede crear deformaciones plásticas importantes y totalmente inadmisibles. Es por lo tanto el ensayo Marshall el encargado de valorar esta característica para todos los grupos de muestras. Los resultados de ensayo Marshall están recogidos en la Tabla 5.28.

Familia	Emulsión, %	Betún, %	Fuerza, N	Deformacion, m
A12F5.0	8,3	5,0	4123 ± 168	0,0021 ± 0,0001
A12F5.5	9,2	5,5	7510 ± 446	0,0025 ± 0,0001
A12F6.0	10,0	6,0	9815 ± 404	0,0027 ± 0,0001
A12F6.5	10,8	6,5	11245 ± 391	0,0031 ± 0,0001
A12F7.0	11,7	7,0	10165 ± 644	0,0032 ± 0,0001
A12F7.5	12,5	7,5	5756 ± 307	0,0040 ± 0,0001

Tabla 5.28. Ensayo Marshall para todos los grupos de muestras con escorias negras y fibras de celulosa.

A su vez, los resultados del ensayo Marshall (fuerza y desplazamiento) se representan gráficamente en la Figura 5.17.

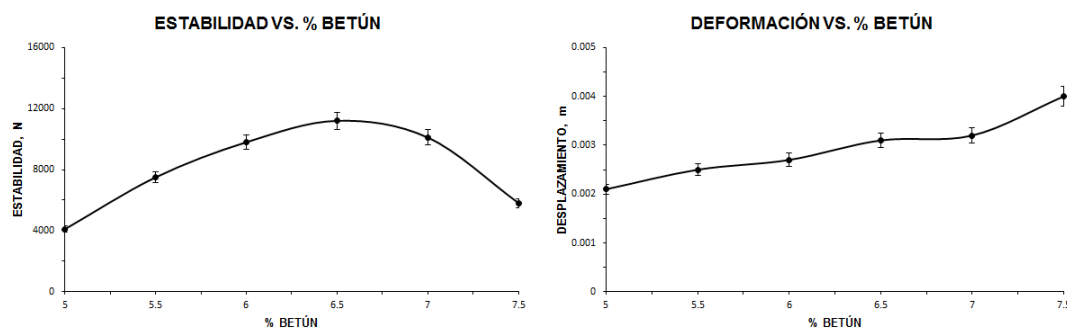


Figura 5.17. Gráfico del ensayo Marshall para todas las familias de probetas con escorias negras y fibras de celulosa.

(a) Estabilidad Marshall y (b) deformación Marshall.

Comentar primeramente que la deformación va creciendo, como es obvio, con el porcentaje de betún adicionado, no obstante, todos los valores de deformación son aceptables, e incluso reducidos en comparación con otro tipo de mezclas. Por otra parte, y según lo establecido en la normativa española, una mezcla de granulometría discontinua o drenantes debe proporcionar un valor de fuerza en el ensayo Marshall superior a 7500 N. En base a esto, puede afirmarse que todas las familias, a excepción de la primera A12F5.0 y la última A12F7.5, son aptas según este ensayo y esa limitación, aun teniendo porcentajes de betún en mezcla muy elevados e imposibles de realizar sin la incorporación de fibras de celulosa en mezcla.

5.2.2.8. Fórmula óptima de trabajo

Las familias de probetas estaban conformadas por escorias negras como árido grueso, fino y polvo mineral de aportación, un 0.5 % de fibras de celulosa sobre árido y porcentajes creciente de emulsión desde el 8.3 % hasta el 12.5 %. Con esta formulación se han realizado numerosas probetas de cada familia para cada uno de los ensayos, tras demostrar la aptitud de la emulsión para la envuelta de la escoria. Estos ensayos han reflejado una serie de valores que han sido comparados con lo establecido en la normativa española, Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para carreteras del año 1976, para desechar aquellas familias que no cumplían alguna de las condiciones.

El ensayo de pérdidas de partículas ha eliminado a las familias A12F5.0 y A12F5.5, el ensayo Marshall a las familias A12F5.0 y A12F7.5, así como el ensayo de pérdida de partículas con inmersión a la familia A12F5.0, A12F5.5 y A12F6.0. Por lo que serían aptas para su fabricación y extensión en carreteras aquellas mezclas correspondientes a las formulaciones de las familias A12F6.5 y A12F7.0.

No obstante, y con la idea principal de optimizar al máximo los materiales, se observa como en el gráfico de la representación de los resultados de la fuerza Marshall con respecto al porcentaje de betún existe una tendencia cuadrática delimitando un valor máximo. Esta variación está condicionada por el porcentaje de betún, ya que un defecto o un exceso del mismo pueden provocar y provoca la reducción de la resistencia Marshall. Al aproximar la serie de puntos a través de una función polinómica y posteriormente obtener el máximo de la misma en el intervalo en estudio, se calcula el óptimo de dosificación del betún y la emulsión. Este valor coincide prácticamente con el 6.5 % de betún y 10.8 % de emulsión (AF126.5), como puede observarse en la gráfica.

Será esta por lo tanto la combinación óptima de materiales, compuesta por la curva granulométrica de las escorias negras mencionada, un porcentaje de emulsión de 10,8 % sobre árido y una adición de fibras de celulosa del 0,5% (porcentajes referidos a la densidad de un árido de densidad 2650 kg/m³).

Por lo tanto, se procede a describir los resultados de estos ensayos para la combinación óptima de materiales en la Tabla 5.29.

Fórmula óptima de trabajo	
6,5% betún y 0,5% de fibras (Familia 4)	
Emulsión bituminosa sobre árido, %	10,8
Betún sobre árido, %	6,5
Fibras de celulosa sobre árido, %	0,5
Densidad aparente, kg/m ³	2445 ± 49
Densidad real, kg/m ³	3130 ± 63
Índice de huecos, %	22,04 ± 45
Pérdida de partículas sin inmersión, %	16 ± 1
Pérdida de partículas con inmersión, %	20 ± 1
Fuerza Marshall, N	11245 ± 216
Desplazamiento Marshall, m	0,0031 ± 0,0001

Tabla 5.29. Resultados de todos los ensayos para la combinación óptima de materiales.

Tras el estudio y la valoración de los resultados desprendidos de los ensayos con la combinación óptima de materiales, se obtienen una serie de conclusiones parciales que se describen a continuación:

- Las escorias negras como árido fino y el mayor porcentaje de betún en la mezcla por la incorporación de las fibras ha propiciado un mastic adecuado capaz de soportar las cargas de tracción. A su vez, la excelente resistencia y forma del árido grueso de las escorias negras ha creado un esqueleto mineral en la mezcla bituminosa capaz de soportar las cargas de compresión del tráfico. Este hecho es observable en el buen comportamiento mecánico que ha reflejado la mezcla ante el ensayo de pérdida de partículas sin inmersión y tras inmersión, así como en el ensayo Marshall.
- La mezcla bituminosa de granulometría discontinua obtenida con la combinación óptima de emulsión bituminosa, escorias negras y fibras de celulosa ha reflejado ante los ensayos mecánicos unos resultados superiores a los conseguidos usualmente para este tipo de mezclas y exigidos por la normativa. Hecho derivado de la utilización de ambos residuos.
- El índice de huecos elevado, debido a la curva granulométrica discontinua y formada principalmente por árido grueso, hace de la mezcla ideal para climas y carreteras secundarias de bajo coste en las cuales no sea rentable aplicar una mezcla drenante pero se pretenda asegurar una buena superficie en periodos de lluvia, ya que este elevado índice de huecos junto a la inclinación de la explanada permitirá absorber el agua de la superficie y retirarla a las cunetas.
- El índice de huecos favorece la macrotextura de la mezcla por el encaje de los áridos gruesos, siendo por lo tanto una superficie segura y con agarre para los vehículos circulantes. A su vez, estos huecos son capaces de absorber el ruido del contacto neumático - pavimento, creando una vía confortable para el usuario y su alrededor.

En base a las conclusiones parciales se puede afirmar que se ha conseguido una mezcla sostenible, con características físicas particulares, con características mecánicas aceptables y con el empleo de residuos de otras industrias y emulsión bituminosas. Este fin se ha conseguido gracias a la selección de los materiales más aptos para este tipo

particular de carreteras, la selección de la técnica más adecuada y sostenible, y el cuidado en los puntos críticos de la metodología con un proceso continuo de retroalimentación de la información. Es por lo tanto un ejemplo dentro del ámbito de la economía circular, creando soluciones interesantes sin perjudicar al medio ambiente y sin sacrificar la calidad de las infraestructuras.

5.2.3. Tratamiento superficial para recuperación de adherencia con escorias de horno de arco eléctrico

A continuación se muestran los ensayos necesarios para la conformación del tratamiento superficial de adherencia con escorias de horno de arco eléctrico, arena sílicea y emulsión bituminosa, según los ensayos lógicamente ordenados y objetivos mencionados en la metodología.

5.2.3.1. Determinación de la curva granulométrica con la combinación de escorias de horno de arco eléctrico y arena sílicea. Determinación de la granulometría de las partículas (UNE-EN 933-1:2012)

Para la conformación de las diferentes mezclas bituminosas con escorias de horno de arco eléctrico y la arena sílicea es necesario primeramente la obtención de la curva granulométrica de ambos materiales. Destacar que los materiales en este trabajo se utilizan como están en fábrica, por eso se analiza su granulometría y no se elabora en laboratorio. Esto es debido al uso directo de este trabajo en infraestructuras viarias sin tener que modificar granulometrías de las escorias y crear procesos con un mayor coste económico. En primer lugar se analizó el tamaño de las partículas de las escorias de horno de arco eléctrico. En la Figura 5.18 se muestra la curva granulométrica de las escorias tal cual se reciben de la industria productora.

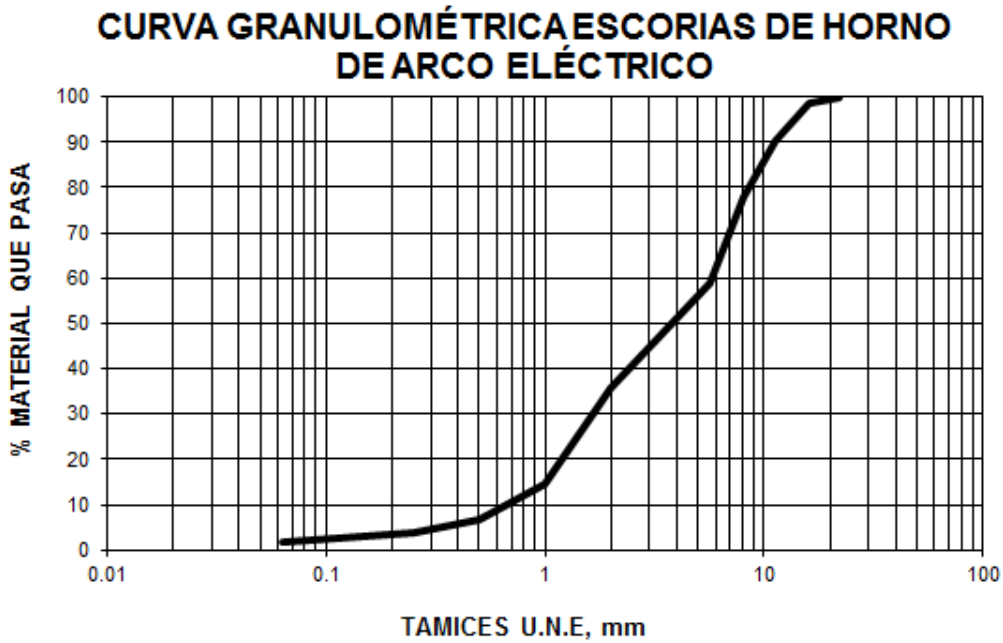


Figura 5.18. Curva granulométrica de las escorias de horno de arco eléctrico.

Como se observa en la Figura 5.18, la curva granulométrica de las escorias de horno de arco eléctrico pertenece a una granulometría discontinua, existiendo principalmente árido grueso y en menor medida árido fino. Dado que el tamaño máximo de partícula es de 16 mm y el tratamiento superficial desarrollado es de tamaño máximo de partícula 8 mm, deben desecharse los tamaños mayores de 8 mm sin alterar los inferiores. Este proceso es rápido y económico si se realiza en fabrica, por lo que no implica un problema importante. En base a esto, la granulometría de las escorias de horno de arco eléctrico con tamaño máximo de árido 8 mm será la utilizada y la que se representa en la Figura 5.19.

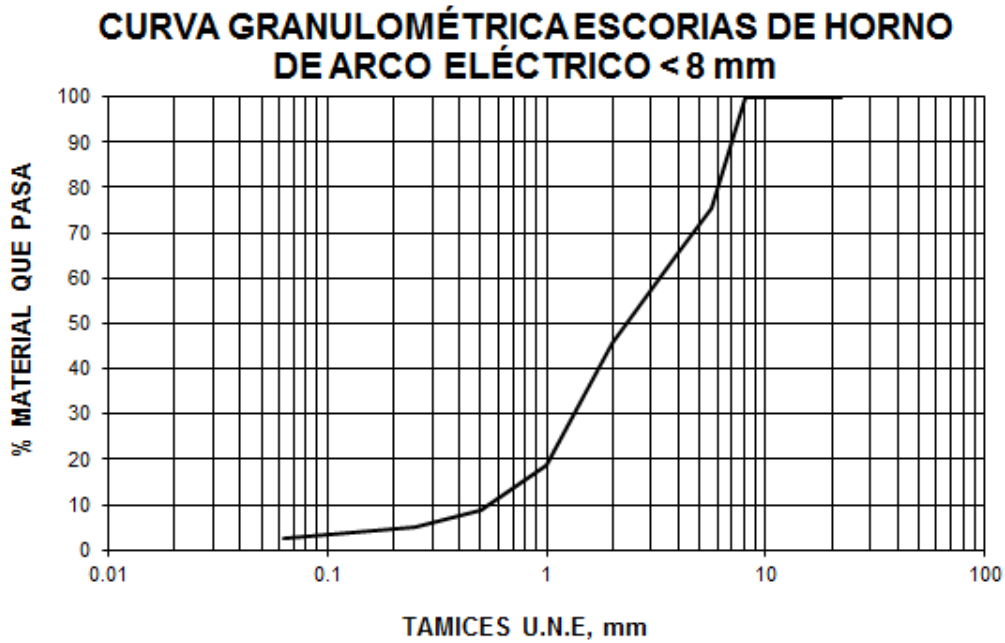


Figura 5.19. Curva granulométrica de las escorias de horno de arco eléctrico tamizadas por el tamiz 8 mm.

Por otra parte la granulometría de la arena sílicea fue estudiada con los mismos tamices y representada en la Figura 5.20.

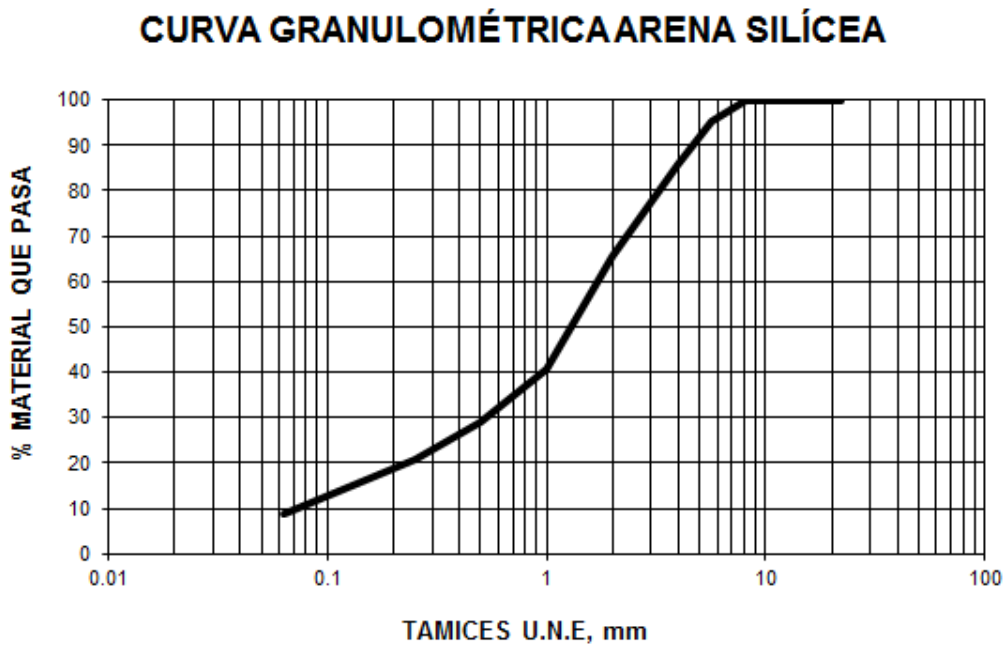


Figura 5.20. Curva granulométrica de la arena sílicea.

Puede observarse que la curva granulométrica de la arena coincide con una granulometría continua. Este material corregirá la granulometría de la escorias de horno

de arco eléctrico proporcionándole el árido fino necesario para la mezcla bituminosa. De esta forma las escorias proporcionan la rugosidad adecuada del tratamiento superficial y la arena, junto con el betún, es la encargada de proporcionar el mastic necesario para la resistencia a tracción y la envuelta de las escorias de horno eléctrico. Este es el motivo principal de la incorporación de la arena silícea, ya que es más económica su incorporación que la distribución de las escorias en diferentes fracciones granulométricas.

Dado que la normativa española fija el huso granulométrico de este tipo de tratamiento superficial de tamaño máximo de árido 8 mm, la curva granulométrica de las escorias de horno de arco eléctrico y la arena silícea debe ajustarse al huso granulométrico definido. La curva granulométrica de la mezcla en masa del 33,3 % de escorias de horno eléctrico y 66,6 % de arena silícea se representa junto con el huso granulométrico definido en la Figura 21.

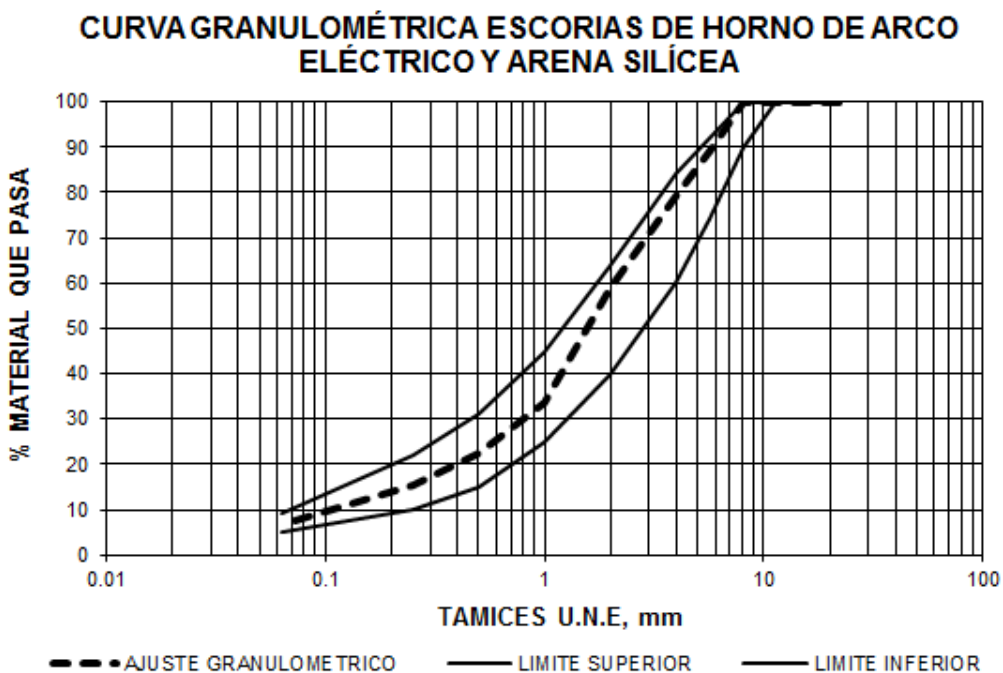


Figura 5.21. Curva granulométrica obtenida por la combinación del 33% de escorias de horno de arco eléctrico y el 66% de la arena silícea.

Se han seleccionado estos porcentajes de combinación por la adecuada curva granulométrica que se obtiene en relación al huso granulométrico prescrito por la normativa. Se observa que prácticamente coincide con la curva granulométrica intermedia del huso granulométrico, por lo que es muy adecuada para su uso.

5.2.3.2. Determinación de la envuelta y la resistencia al desplazamiento por el agua de las emulsiones bituminosas (NLT-196/84)

Determinado el porcentaje de combinación de las escorias y la arena se procedió a estudiar la compatibilidad del árido con la emulsión, así como los porcentajes de emulsión y agua necesarios. Cabe destacar que en adelante cuando se mencione al árido, se refiere a las escorias de horno de arco eléctrico en un 33,3 % y arena silícea en un 66,6 %. Por lo tanto, todos los porcentajes de betún, emulsión bituminosa y agua estarán referidos al árido obtenido por la combinación de ambos materiales.

La compatibilidad de la emulsión bituminosa con el árido se determinó a través del ensayo de envuelta. El ensayo de envuelta, detallado en la metodología. Este ensayo se realizó con un porcentaje de agua de amasado del 12,5 %. El porcentaje de agua corresponde al agua de preenvuelta y al agua de la emulsión. El porcentaje de betún será el intermedio del intervalo fijado por la normativa, por lo tanto un 7 %. Este porcentaje le corresponderá un porcentaje de emulsión de 11,7 % y en definitiva un porcentaje de agua de preenvuelta de 7,8 %. Se mezclaron todos los materiales con estas prescripciones en seco y con agua. Las imágenes del ensayo de envuelta se muestran en la Figura 5.22.

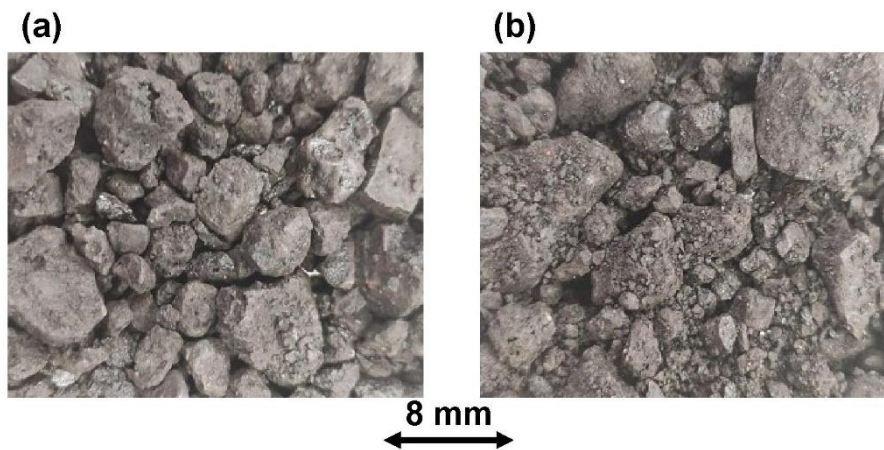


Figura 5.22. Ensayo de envuelta con el agua de preenvuelta y la emulsión bituminosa C60B4 MIC. (a) Ensayo de envuelta. (b) Ensayo de envuelta tras lavado en agua.

Se observa en la Figura 5.22. que la adhesión de la emulsión bituminosa en seco y con agua es muy buena. El árido (escorias de horno de arco eléctrico y arena silícea) está cubierto totalmente por la emulsión y no se desprende tras su mezclado con agua.

Por lo tanto, puede concluirse que la emulsión C60B4 MIC es adecuada para su uso con este tipo de árido.

5.2.3.3. Determinación del contenido mínimo de ligante y resistencia al desgaste (UNE-EN 12274-5:2020)

Determinada la compatibilidad de la emulsión con el árido, se conformaron diferentes probetas de cada familia con los porcentajes de emulsión y agua fijados, y la granulometría detallada en la Figura 5.21. El ensayo de resistencia al desgaste reflejó los resultados que se muestran en la Figura 5.23.

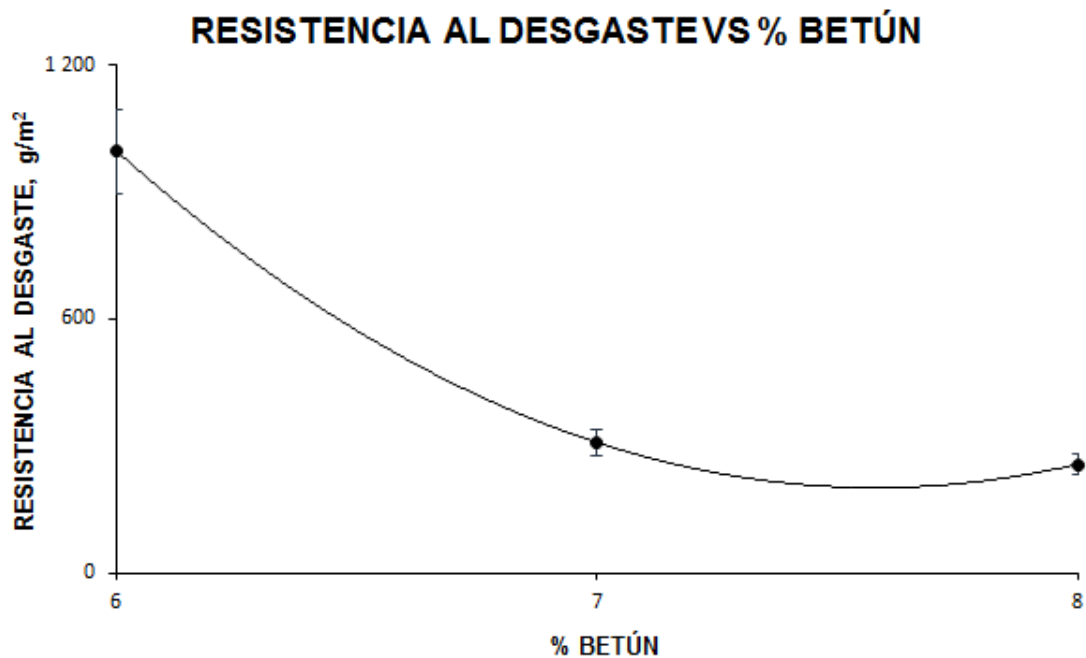


Figura 5.23. Determinación de la resistencia al desgaste de las diferentes familias de mezclas bituminosas según el porcentaje de betún (standard UNE-EN 12274-5).

El ensayo de resistencia al desgaste en agua de las diferentes familias manifiesta la disminución de la pérdida de masa con el aumento del porcentaje de emulsión bituminosa. Algo esperable si se tiene en cuenta que un mayor porcentaje de emulsión implica un mayor porcentaje de betún, y por lo tanto, una envuelta más completa de la escoria que impide su desprendimiento. Las familias MIC2 y MIC3 obtienen resultados aceptables, ya que la normativa española limita el valor máximo de resistencia al desgaste en 350 g/m² para tráfico importantes.

5.2.3.4. Determinación del porcentaje de aditivo para el control de la rotura de la emulsión. Ensayo de envuelta (NLT-196/84)

Es imprescindible que los tiempos de rotura se adapten al ritmo de trabajo de la fabricación y extensión de la mezcla bituminosa. Para ello se tomó como tiempo de rotura adecuado 35 segundos. La elección de este tiempo está motivada por una razón fundamental, siendo esta la de ser usual en el mundo laboral en la conformación de este tipo de tratamientos superficiales. No obstante, dependiendo de las condiciones climáticas, del ritmo de la construcción y de factores diversos, puede modificarse el tiempo de rotura con la incorporación del aditivo para tal fin. El aditivo descrito en materiales será incorporado en las diferentes familias de mezclas bituminosas hasta obtener un tiempo de rotura en todas de 35 segundos. Los porcentajes de aditivo para cada familia de muestras para la obtención del tiempo de rotura estipulado se reflejan en la Figura 5.24.

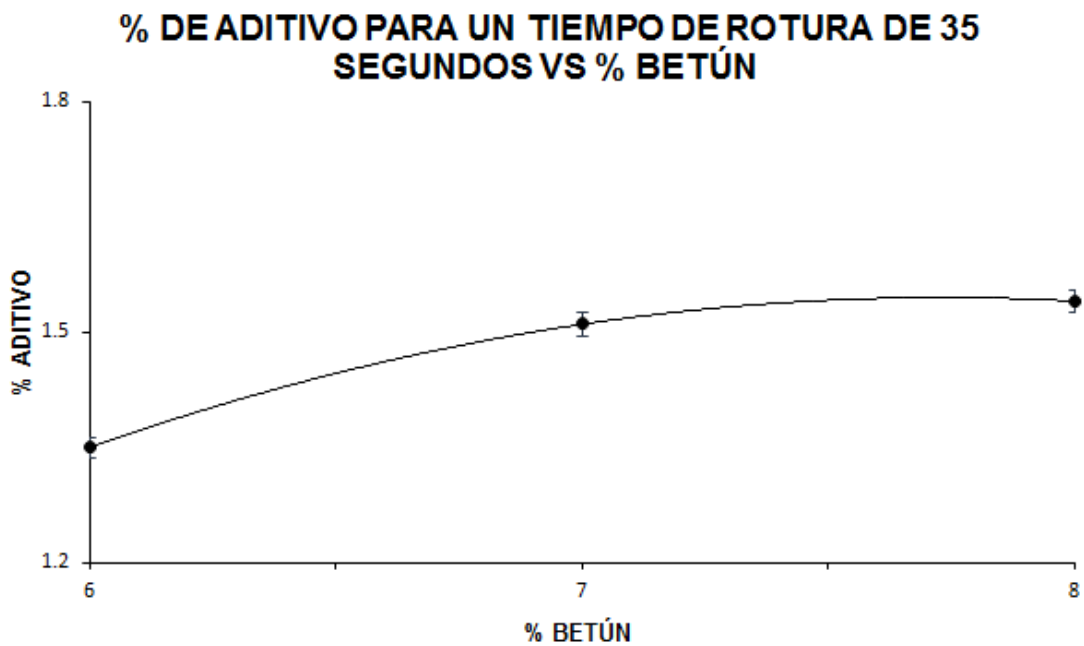


Figura 5.24. Porcentaje de aditivo necesario en cada familia para la obtención de un tiempo de rotura de 35 segundos de la emulsión.

La Figura 5.24. refleja como para un mayor porcentaje de emulsión es necesario un mayor porcentaje de aditivo, no obstante las variaciones son mínimas. Este hecho se debe principalmente al menor porcentaje de emulsión para la envuelta del árido, por lo

que su absorción es mayor y su tiempo de rotura menor. No obstante, las variaciones son mínimas.

5.2.3.5. Determinación de la cohesión de la mezcla (UNE-EN 12274-4:2020)

Finalmente el ensayo de cohesión determinó la resistencia que ofrecía el tratamiento superficial ante las tensiones tangenciales aplicadas. Está directamente relacionado con la buena adherencia del tratamiento con la capa inferior, así como con el tiempo necesario para la apertura de la infraestructura al tráfico tras la ejecución del tratamiento. Los resultados del ensayo de cohesión para las diferentes familias de mezclas bituminosa se detallan en la Figura 5.25.

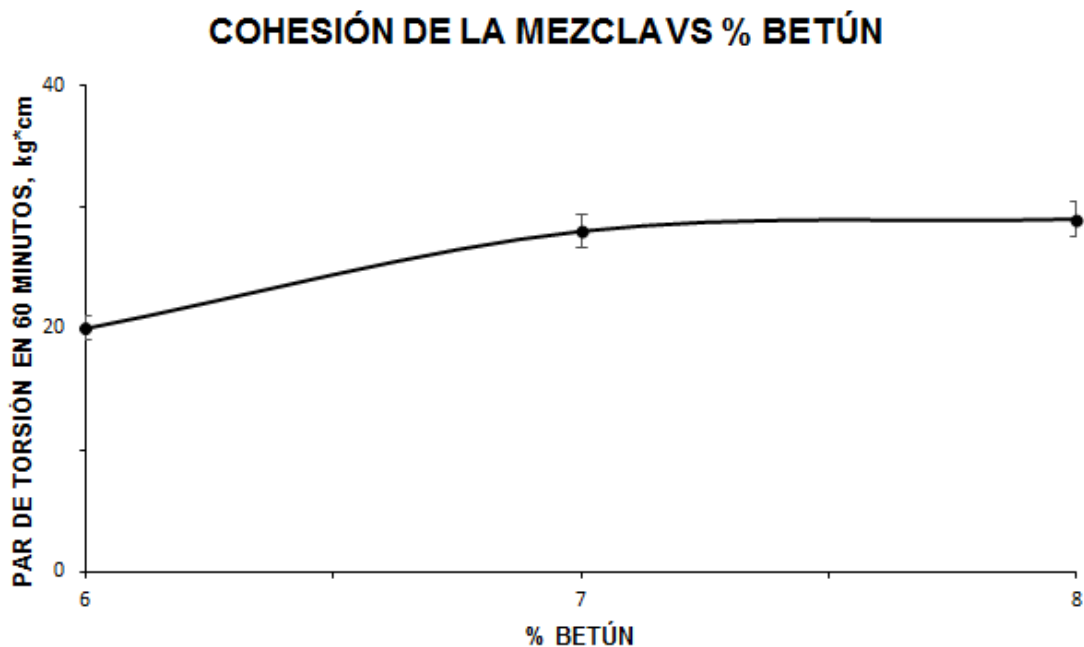


Figura 5.25. Determinación de la cohesión de las diferentes familias de mezclas bituminosas según el porcentaje de betún (standard UNE-EN 12274-4).

Los resultados muestran una similitud entre las familias de mezclas bituminosas MIC 2 y MIC3, y un valor mucho más bajo para la familia MIC1. La normativa al respecto fija que el par mínimo de torsión para tráfico importantes es de 20 kg·cm, por lo tanto, todos los valores son aceptables. No obstante el valor de la familia MIC1 se encuentra en el límite para su aceptación, por lo que podría ser desaconsejable su uso.

5.2.3.6. Combinación óptima de los materiales

En base a los resultados de los diferentes ensayos a las tres familias de muestras, en este apartado se seleccionará la familia que proporciona unos resultados técnicos aceptables y a su vez supone un menor coste económico y ambiental.

La familia MIC1 con un porcentaje de betún del 6% mostró resultados negativos en el ensayo de abrasión por vía húmeda. Este ensayo es esencial para el correcto funcionamiento del tratamiento superficial, ya que refleja su comportamiento en la infraestructura. Por lo tanto esta familia denominada MIC1 se ha desechado para su empleo.

Por otra parte, las familias MIC2 y MIC3 presentan resultados aceptables y similares en los diversos ensayos. Además estos resultados son aceptables según la normativa vigente, no solo para tráfico intermedios sino para tráfico importantes. Las características físicas y mecánicas de las escorias de horno eléctrico muestran la idoneidad de su utilización en tratamientos superficiales.

Dentro de la elección entre las dos familias cabe destacar que la familia MIC2 obtiene resultados aceptables con un porcentaje de betún menor en un uno por ciento, por lo tanto respeta más los niveles de calidad y sostenibilidad, ya que con el uso de menor proporción de materias primas consigue resultados similares y aceptables. Por lo tanto se propuso esta combinación óptima de materiales como la idónea para el empleo en tratamientos superficiales de alta adherencia en infraestructuras con tráfico importantes y escorias de horno de arco eléctrico.

Las muestras se volvieron a conformar y se rehicieron los ensayos de esta familia. Los resultados de los diferentes ensayos se muestran en la Tabla 5.30.

MIC2	Value
Combinación de áridos	33,3% EAFS + 66,6% silica sand
% betún	7
% emulsión bituminosa	11,7
% agua de preenvuelta	7,8
% aditivo	1,5
Resistencia al desgaste, g/m ²	301 ± 9
Tiempo de rotura, s	35 ± 0
Cohesión a los 60 minutos, kg·cm	29 ± 1

Tabla 5.30. Resultados de los ensayos del tratamiento superficial con escorias de horno de arco eléctrico y la combinación óptima de materiales.

Los resultados de los diferentes ensayos realizados en la metodología manifiestan una serie de conclusiones parciales que confluyen en la conclusión final sobre la utilización de escorias de horno de arco eléctrico en tratamientos superficiales para carreteras. Se procede a descubrir las conclusiones parciales obtenidas de este estudio.

- En las diferentes familias de probetas, conformadas con escorias de horno de arco eléctrico y arena silícea, se ha podido observar que el incremento del porcentaje de emulsión provocaba una mayor resistencia al desgaste de la mezcla bituminosa, obteniendo valores aceptables a partir del 7 % de emulsión.
- La cohesión de la mezcla bituminosa aumenta a medida que aumenta el porcentaje de emulsión, reflejando todas las familias una cohesión adecuada desde el 6 % de emulsión al 8 %. Este hecho deriva en una mejor adhesión del tratamiento a la capa superficial del pavimento donde se aplica y un buen comportamiento ante las cargas del tráfico.
- La familia seleccionada como óptima, posee una granulometría formada por el 33,3 % de escorias de horno de arco eléctrico tamizadas por el tamiz 8 mm y un 66,6 % de arena silícea. Los porcentajes de emulsión bituminosa son del 11,7 % y el 7,8 % de agua de preenvuelta. A su vez, el aditivo se adicionó en un 1,5 % para conseguir tiempos de rotura adecuados.

En base a las conclusiones detalladas se puede afirmar que es posible la realización de tratamientos superficiales, impermeabilizantes y de alta adherencia con emulsión bituminosa y escorias de horno de arco eléctrico. Creando, por lo tanto, una mezcla bituminosa sostenible de características físicas y mecánicas adecuadas, y con un menor impacto ambiental gracias a la utilización de un residuo y a la conformación a temperatura ambiente de la mezcla, por el uso de la emulsión.

5.2.4. Mezclas bituminosas SMA (Stone Mastic Asphalt) con escorias de horno de arco eléctrico y escorias de horno cuchara

Determinada la curva granulométrica, los porcentajes de betún adicionar así como el porcentaje de fibras, se procede a la realización de las diferentes probetas con porcentajes crecientes de betún. Estos porcentajes de betún van desde el 15 % al 18 % en volumen, conformando las probetas Marshall según los métodos detallados en la metodología. Con todas las probetas realizadas de cada familia y porcentaje de betún, se procede a realizar los diferentes ensayos físico y mecánicos que se muestran a continuación.

5.2.4.1. Determinación de la densidad aparente (UNE-EN 12697-6:2012)

Todas las probetas conformadas fueron analizadas para evaluar sus propiedades físicas y resistentes. El primero de los ensayos realizados a las mezclas bituminosas fue el de densidad aparente. Este ensayo se refleja gráficamente en la Figura 5.26.

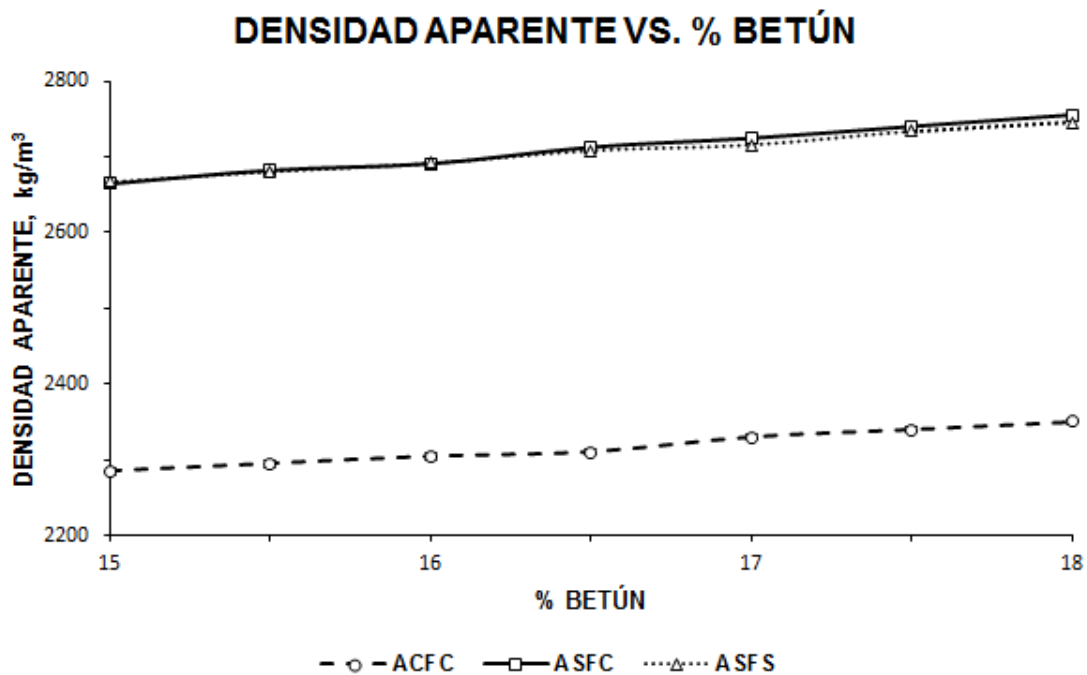


Figura 5.26. Densidad aparente de las mezclas bituminosas conformadas con escorias de horno de arco eléctrico, árido corneano, escorias de horno cuchara, filler calizo y fibras de celulosa, con diferentes porcentajes de betún en volumen y sobre árido.

Como puede observarse, la densidad aparente de las mezclas bituminosas con escorias de horno de arco eléctrico es superior a la densidad aparente de las mezclas con

árido corneano. Este hecho se debe fundamentalmente a la mayor densidad de las escorias de horno de arco eléctrico, no influyendo negativamente en los resultados posteriores pero si siendo un factor a tener en cuenta. La diferencia de densidad entre las mezclas conformadas con filler calizo o filler de escorias de horno cuchara es muy reducida, ya que la densidad de ambos materiales es similar y a su vez el porcentaje de incorporación del filler es menor.

5.2.4.2. Determinación de la densidad máxima (UNE-EN 12697-5:2020)

La densidad máxima de las mezclas bituminosas conformadas se detalla en la Figura 5.27.

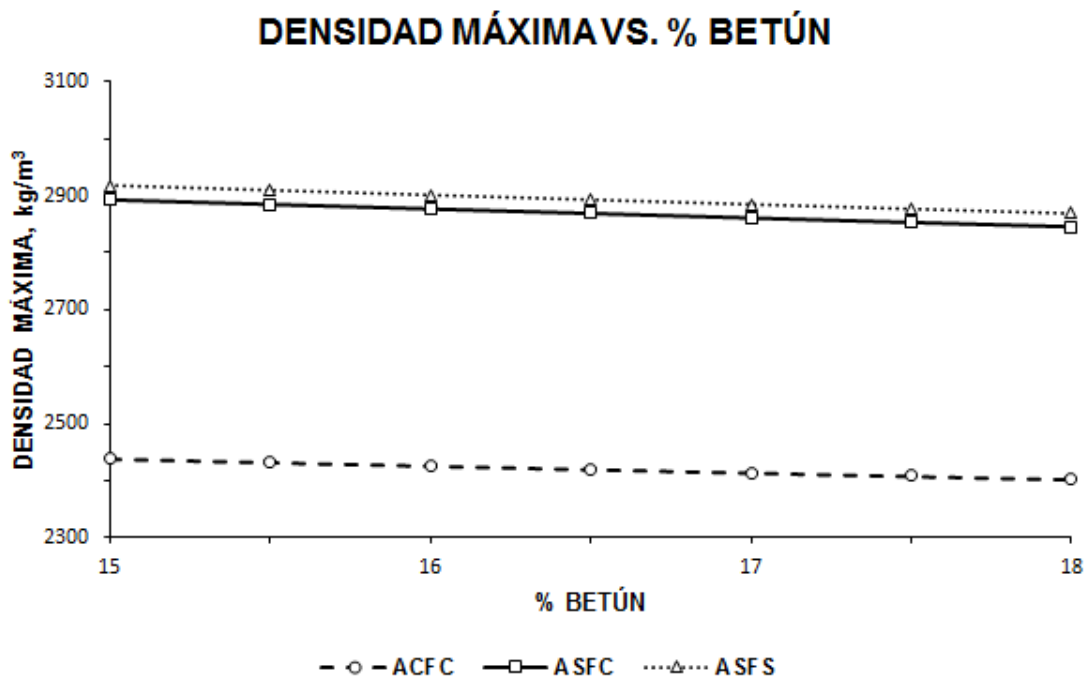


Figura 5.27. Densidad máxima de las mezclas bituminosas conformadas con escorias de horno de arco eléctrico, árido corneano, escorias de horno cuchara, filler calizo y fibras de celulosa, con diferentes porcentajes de betún en volumen y sobre árido.

Al igual que en el caso anterior, la densidad máxima de las mezclas que contienen escorias de horno de arco eléctrico es superior a las que incorporan árido corneano, debido a la mayor densidad de este material. A su vez, las mezclas que contienen escorias de horno cuchara poseen una densidad levemente superior a las mezclas conformadas con filler calizo. Los resultados de este ensayo, así como el de densidad aparente, condicionan directamente el porcentaje de huecos de las mezclas bituminosas.

El porcentaje de huecos es esencial de calificar para conocer el comportamiento de la mezcla bituminosa, estando limitado por la normativa.

5.2.4.3. Determinación del contenido de huecos (UNE-EN 12697-8:2020)

El contenido de huecos de las diferentes familias de mezclas se muestra en la Figura 5.28.

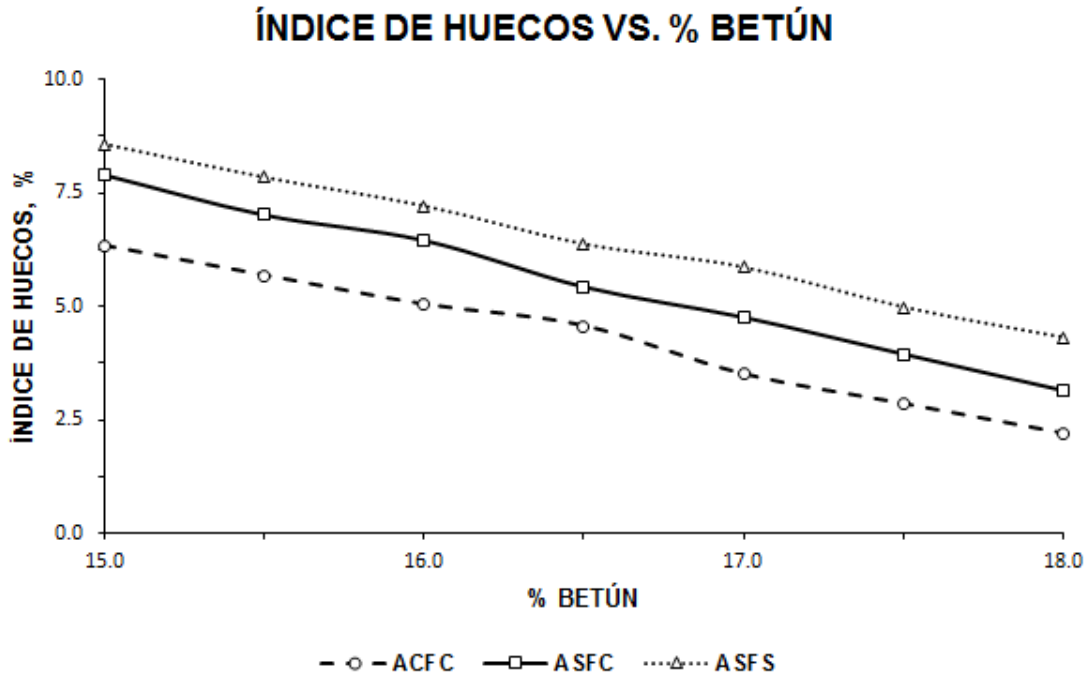


Figura 5.28. Índice de huecos de las mezclas bituminosas conformadas con escorias de horno de arco eléctrico, árido corneano, escorias de horno cuchara, filler calizo y fibras de celulosa, con diferentes porcentajes de betún en volumen y sobre árido.

El porcentaje de huecos es una característica esencial para evitar la formación de deformaciones plásticas, drenar el agua de lluvia de la superficie, conseguir una mayor fricción entre neumático y pavimento, incluso, para la reducción del ruido provocado por la circulación de vehículos. Por lo tanto, la normativa española limita el porcentaje de huecos entre el 4% y el 7% para este tipo de mezcla bituminosa. Basándose en lo comentado, se observa como la mezcla con árido corneano posee un índice de huecos menor que las mezclas conformadas con escorias de horno de arco eléctrico. Este hecho indica una mayor absorción del betún por parte de las escorias de horno de arco eléctrico y las escorias de horno cuchara.

Según las limitaciones detalladas, las mezclas bituminosas ACFC son válidas hasta el 17% de betún en volumen y sobre árido. Porcentajes superiores de betún desarrollarían un índice de huecos inaceptable. Por otra parte, las mezclas bituminosas ASFC poseen porcentajes de betún aceptables desde el 15.5 % al 17.5 %, según las limitaciones marcadas por la normativa. A su vez, las mezclas bituminosas ASFS muestran porcentajes aceptables de betún según las mismas limitaciones del 16 % al 18 %.

5.2.4.4. Ensayo Marshall (UNE-EN 12697-34:2013)

El ensayo Marshall será el encargado de mostrar la resistencia mecánica de la mezcla bituminosa y en definitiva, dentro del rango detallado anteriormente por el índice de huecos, la combinación óptima de materiales para cada familia de muestras. En la Figura 5.29. se representa gráficamente la resistencia Marshall de las diferentes familias de probetas.

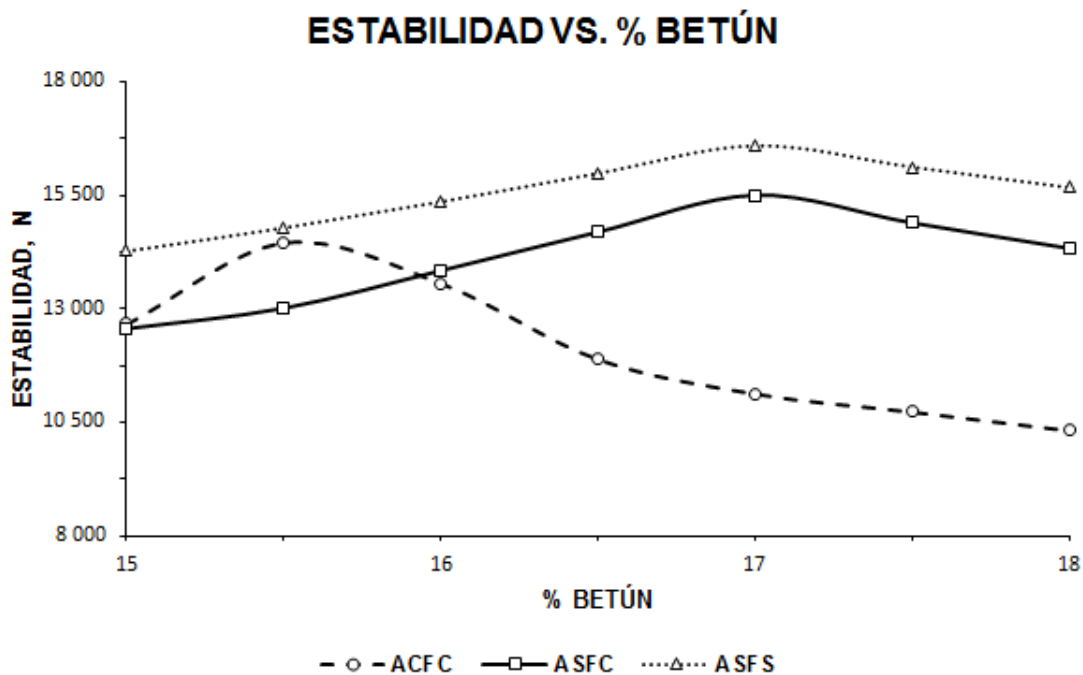


Figura 5.29. Estabilidad Marshall de las mezclas bituminosas conformadas con escorias de horno de arco eléctrico, árido corneano, escorias de horno cuchara, filler calizo y fibras de celulosa, con diferentes porcentajes de betún en volumen y sobre árido.

El ensayo Marshall refleja una resistencia mecánica superior de las mezclas bituminosas conformadas con escorias de horno de arco eléctrico como árido y escorias

de horno cuchara como filler. A su vez, la mezcla con escorias de horno de arco eléctrico y filler calizo presenta una resistencia menor que la anterior pero levemente superior a la resistencia de la mezcla bituminosa conformada con árido corneano y filler calizo. De este hecho se pueden obtener dos conclusiones, por una parte, la escoria de horno cuchara influye notablemente en la resistencia mecánica de las mezclas bituminosas conformadas, gracias a sus características cementantes; por otra parte, la utilización de escorias de horno de arco eléctrico hace posible la absorción de un mayor porcentaje de betún que el árido corneano y se obtienen mejores resistencias mecánicas. Este mayor porcentaje de betún, junto con el filler y las fibras, obtiene un mastic de calidad para soportar las cargas repetidas del tráfico y, en consecuencia, una mayor durabilidad de la mezcla bituminosa en el tiempo. Cabe destacar que si no se hubiera realizado una dosificación en volumen, la mayor densidad de las escorias de horno de arco eléctrico hubieran enmascarado los resultados y no se hubieran podido obtener las conclusiones detalladas.

Además, el ensayo Marshall refleja la posibilidad de valorar las deformaciones plásticas que se pudieran producir en el pavimento. Por lo tanto, es esencial el representar y evaluar la deformación de cada familia de mezclas bituminosas. La deformación Marshall se muestra en la Figura 5.30.

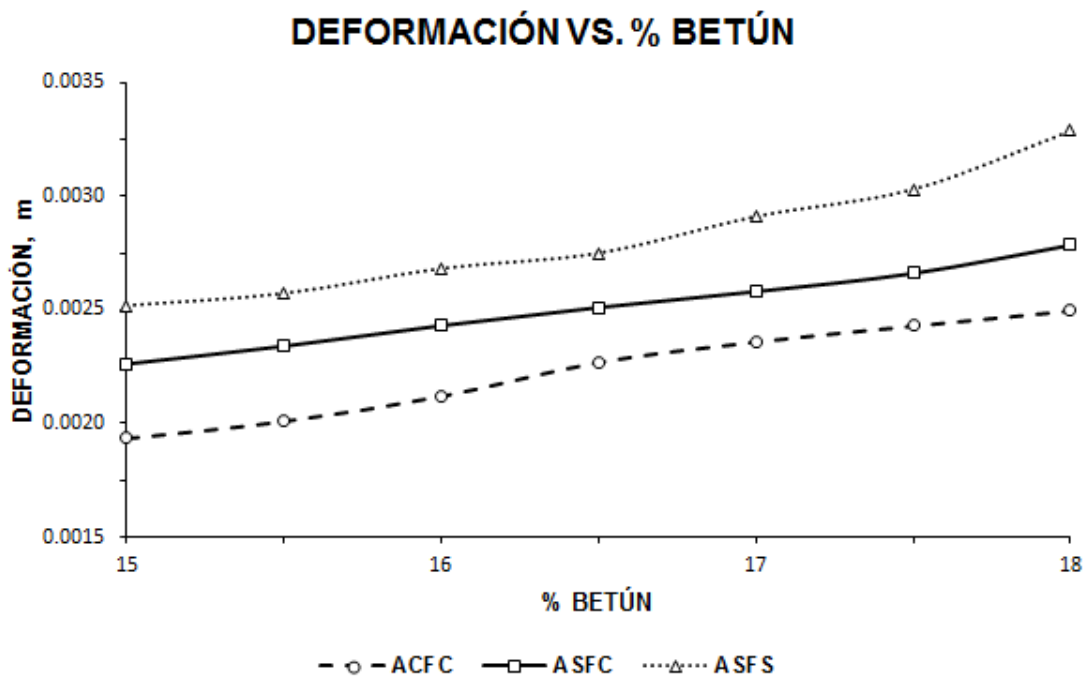


Figura 5.30. Deformación Marshall de las mezclas bituminosas conformadas con escorias de horno de arco eléctrico, árido corneano, escorias de horno cuchara, filler calizo y fibras de celulosa, con diferentes porcentajes de betún en volumen y sobre árido.

La deformación Marshall, o desplazamiento durante el ensayo, está limitada por la normativa española para este tipo de mezcla bituminosa. El rango aceptable de resultados de la deformación Marshall es de 2 a 3 mm. Por lo tanto, la familia de mezclas bituminosas ACFC posee porcentajes válidos de deformación desde el 15.5 % en adelante. La familia ASFC posee porcentajes de betún aceptables en todo su rango para la obtención de deformaciones Marshall adecuadas. Finalmente, la familia ASFS posee deformaciones adecuadas, según la normativa, en los porcentajes de betún del 15 % al 17.5 %. Cabe destacar la mayor deformación de las mezclas bituminosas conformadas con escorias de horno eléctrico y, en concreto, de las mezclas que incorporan filler de escorias de horno cuchara. Esta mayor deformación se debe principalmente al mayor porcentaje de betún, no obstante, las variaciones entre las distintas familias son reducidas.

5.2.4.5. Determinación de las fórmulas óptimas de trabajo y comparación de los resultados

Una vez analizadas física y mecánicamente las familias de mezclas bituminosas (ACFC, ASFC y ASFS) se procedieron a la obtención de la combinación óptima de materiales. Para ello, se tomó como ensayo de referencia el ensayo Marshall, ya que el fin es obtener una mezcla bituminosa resistente y sin problemas de deformaciones plásticas. Por lo tanto, se seleccionó el porcentaje de betún que mayor estabilidad Marshall proporcionaba, siempre y cuando las demás propiedades físicas fueran aceptables según la normativa.

Con esta combinación óptima de materiales para cada familia, se volvieron a ejecutar los ensayos anteriores para corroborar la calidad de las mezclas, así como los ensayos de escurrimiento de ligante (norma UNE-EN 12697-18) y de deformación permanente (norma UNE-EN 12697-22). Los resultados de todos los ensayos realizados para la combinación óptima de materiales de cada familia se detallan en la Tabla 5.31.

Test	Standard	ACFC	ASFC	ASFS
Porcentaje óptimo de betún (en volumen y sobre árido)	-	15,5 %	17 %	17 %
Densidad aparente	UNE-EN 12697-6	2291 ± 46 t/m ³	2716 ± 53 t/m ³	2721 ± 54 t/m ³
Densidad máxima	UNE-EN 12697-5	2436 ± 49 t/m ³	2857 ± 57 t/m ³	2887 ± 58 t/m ³
Void content	UNE-EN 12697-8	5,9 ± 0,1 %	4,9 ± 0,1 %	5,8 ± 0,1 %
Estabilidad Marshall	UNE-EN 12697-14	14586 ± 287 N	15524 ± 307 N	16658 ± 331 N
Deformación Marshall	UNE-EN 12697-14	0,0020 ± 0,0001 mm	0,0026 ± 0,0001 mm	0,0028 ± 0,0001 mm
Escurrecimiento de ligante	UNE-EN 12697-18	0 ± 0 %	0 ± 0 %	0 ± 0 %
Deformación permanente (10000 ciclos; 60 °C)	UNE-EN 12697-22	0,07 ± 0,01 mm	0,05 ± 0,01 mm	0,04 ± 0,01 %

Tabla 5.31. Resultados de los ensayos para la combinación óptima de materiales de las diferentes familias de mezclas bituminosas ACFC, ASFC y ASFS.

Como puede observarse en la Tabla 5.31. los resultados reflejados de los ensayos anteriores para la combinación óptima de materiales de las tres familias de mezclas bituminosas son aceptables según la normativa española ORDEN CIRCULAR OC 3/2019. Además, las tres mezclas detalladas reflejan resultados excelentes en

comparación con otro tipo de mezclas bituminosas, pudiéndose emplear todas para carreteras de tráfico importante.

No obstante, y con el fin de evaluar cuál es la influencia que produce en la mezcla bituminosa la incorporación de los residuos, cabe destacar los mejores resultados obtenidos por la familia ASFS conformada con escorias de horno de arco eléctrico y escorias de horno cuchara. Con resultados similares, pero levemente inferiores, se haya la mezcla bituminosa ASFC y, finalmente, con diferencias importantes en cuanto a resistencia y porcentajes de betún se encuentra la mezcla ACFC.

Más concretamente, las densidades de las tres familias difieren por la mayor densidad de las escorias utilizadas. No obstante, el porcentaje de huecos obtenido es similar aun empleando un porcentaje de betún mayor en las mezclas con escorias de horno de arco eléctrico. Este mayor porcentaje de betún, sin producir problemas de exudaciones como así lo confirma el ensayo de escurrimiento, implica una mayor resistencia de la mezcla para soportar las cargas repetidas de tracción del tráfico. Este hecho se refleja mediante el ensayo de deformación permanente, consiguiéndose los mejores valores en la mezclas ASFS y ASFC. La resistencia Marshall de las mezclas bituminosas refleja el excelente comportamiento de la utilización de escorias de horno de arco eléctrico y escorias de horno cuchara, siendo la familia con resistencias más altas. Finalmente comentar el correcto funcionamiento de las fibras de celulosa de la industria papelería como aditivo en las mezclas, ya que ha permitido en todas las familias la incorporación de porcentajes superiores de betún sin la producción de exudaciones.

6. Conclusions

The development of the present thesis, with the initial characterisation of the slag from the electric arc furnace and ladle furnace, as well as the execution of different bituminous mixtures for road conservation and maintenance, leads to a series of partial conclusions which derive in the final conclusion. This final conclusion is the value and goodness of the use of electric arc furnace slag and ladle furnace slag in the manufacture of bituminous mixtures for road maintenance and conservation. The importance of using industrial waste as opposed to traditional virgin materials should be highlighted, as it means a reduction in CO₂ emissions and environmental pollution from the treatment of new materials. The final conclusions obtained are set out below.

- Ladle furnace slag has an inorganic composition, its chemical composition being mainly calcium, magnesium and silicon oxides. These oxides are mainly responsible for the cementitious characteristics they possess, as has been corroborated by various investigations into their use as additives in cement.
- Ladle furnace slag has a slightly higher actual density than a conventional aggregate, as well as a reduced particle size. This reduced particle size has been demonstrated by the bulk density test in kerosene. It therefore provides a higher specific surface area to absorb a higher percentage of bitumen and create a resistant mastic. However, ladle furnace slags do not possess any plasticity.
- Electric arc furnace slag has an inorganic composition consisting mainly of metal element oxides. These oxides have been formed by the very process of formation of the slag in the melting stage counting with the typical metallic elements of the composition of the steel, the scrap or of the material added for its manufacture.
- The density of electric arc furnace slag is high, not reflecting the existence of a high percentage of colloidal particles. Therefore, this higher density must be taken into account for the correct proportioning of the additives and the bitumen or emulsion, otherwise important errors would be made that would condition the properties of the final bituminous mix. In turn, the shape of the particles of the electric arc furnace slag with a multitude of sharp edges, mainly cubic forms, various broken surfaces and no flakiness particle-type, make this material ideal for use in

bituminous mixtures with discontinuous grading, since it is in this type of mixture where the loads are supported by the coarse aggregate, by internal friction. Therefore, the probability of producing subsequent deformations by to the passage of traffic is reduced.

- Electric arc furnace slag has excellent resistance to fragmentation and thermal fatigue, being these properties being essential for use on high traffic roads and important. In addition, the excellent resistance of the slag to polishing by the tyre makes it possible to use it in wearing courses. This factor ensures with high probability the conservation of the roughness of the pavement and its safety throughout its working life.
- The development of cold in-place recycling with bitumen emulsion and ladle furnace slag creates a bituminous mixture with suitable characteristics, optimum physical properties and resistance superior to those required by the Spanish regulations in this respect.
- The REC C60B5 cationic slow setting emulsion bitumen emulsion showed good compatibility with the combination of ladle slag and milled asphalt pavement, as reflected in the coating test. Both the emulsion's adhesion to the aggregate and its cohesion and breaking times are suitable for use with ladle furnace slag and reclaimed asphalt pavement.
- Cold in-place recycling with bitumen emulsion and ladle furnace slag is an excellent option for the use of a high percentage of waste and the achievement of adequate strength properties. It is therefore a sustainable and viable mix for its establishment.
- Porous asphalts with discontinuous grading, bitumen emulsion, electric arc furnace slag and cellulose fibers are sustainable and economical mixtures. In this type of mixes, the qualities and properties of each of the wastes that make up the mix are exploited to the full, obtaining very interesting characteristics of porosity and resistance.
- The porous asphalt developed with electric arc furnace slag and bitumen emulsion has a quality mastic capable of withstanding the traction loads of traffic, thanks to the higher percentage of bitumen in the bituminous mix due to the incorporation

of cellulose fibers, as well as by the fine aggregate of slag. In turn, the excellent resistance and shape of the coarse aggregate of the electric arc furnace slag develops a mineral skeleton in the bituminous mix capable of resisting the compressive loads of traffic. This fact is reflected in the good mechanical behaviour of the bituminous mix in the particle loss test and Marshall test.

- The porous asphalt obtained with the optimum combination of bitumen emulsion, electric arc furnace slag and cellulose fibers has shown better results in the mechanical tests than those usually obtained for this type of bituminous mixes and required by the regulations. Fact derived from the use of both wastes.
- The high void content of porous asphalt with electric arc furnace slag, due to the discontinuous grading formed by the slag, makes the bituminous mix ideal for most low-cost regional climates and roads, where it is not cost-effective to apply traditional hot mix porous asphalt, but where a safe pavement is paramount. This high void content encourages the macrotexture of the asphalt mixture by interlocking the coarse aggregates, thus ensuring a safe and adherent wearing course for vehicles. In turn, these voids are able to drain rainwater and absorb noise from tyre contact with the pavement, creating a comfortable pavement for the user.
- The surface treatments formulated with bitumen emulsion and electric arc furnace slag have excellent resistance, durability and cohesion characteristics.
- The shape of the different particles of the electric furnace slag is suitable for use in surface treatments to increase friction, as they have a high microtexture and a very irregular surface. This fact, together with the excellent resistance to fragmentation and the freezing-thawing cycles, makes the electric arc furnace slag an ideal aggregate for use in high adherence surface treatments and in important traffic.
- The cohesion of the surface treatments increases as the percentage of emulsion increases, with all families reflecting an adequate cohesion from 6% emulsion to 8%. This fact results in a better adherence of the treatment to the surface layer of the aged pavement where it is applied and a good reaction to traffic loads.
- The tests carried out demonstrate the technical feasibility of this surface treatment with electric arc furnace slag for its execution. At the same time, the execution of this investigation does not imply important changes in comparison with traditional

surface treatments, so that only the usual cares should be taken for the execution of this technique.

The bituminous mixtures developed have a number of objective environmental advantages over traditional mixtures. Firstly, it uses waste from different industries, thus reducing gas emissions from the extraction of raw materials. In addition, the use of bitumen emulsion reduces gas emissions compared with the use of hot mixes asphalt. Finally, the creation of a comfortable and safe pavement significantly reduces fuel consumption.

In turn, developed bituminous mixtures are more economical than traditional bituminous mixtures. This cost reduction is mainly due to the use of waste instead of raw materials. At the same time, equipments for manufacturing bituminous mixtures with bitumen emulsion are much more economical, reducing the consumption of fossil fuels to heat the mixture. In addition, obtaining a mix with a high percentage of bitumen creates a durable mix where the working life will be longer, reducing reparation activities.

In short, and based on the conclusions derived from the methodology presented in this investigation and according to the results of the tests carried out, it can be stated that the incorporation of electric arc furnace slag and ladle furnace slag creates bituminous mixtures with similar physical properties and improved resistance compared to traditional materials. The quality of these by-products is therefore assured for use in bituminous mixtures dedicated to road maintenance. However, the use of electric arc furnace slags and ladle furnace slags as elements for various types of sustainable mixes requires special care in some particularities that they possess and differ from those of virgin aggregates. However, they develop sustainable, economical, resistant and durable materials.

7. Líneas futuras de investigación

En este apartado se describen las posibles líneas de investigación que se derivan de la presente tesis desarrollada con escorias de horno de arco eléctrico y escorias de horno cuchara. Estas líneas se detallan a continuación:

- Desarrollo de mezclas bituminosas templadas con escorias de horno de arco eléctrico y escorias de horno cuchara.
- Evaluación de la durabilidad de mezclas bituminosas conformadas con escorias de horno de arco eléctrico y escorias de horno cuchara a través de ensayos de envejecimiento.
- Evaluación y caracterización de otras escorias industriales como las del acero inoxidable.
- Evaluación de nuevos pavimentos sostenibles con 100 % de subproductos industriales.
- Desarrollo de mezclas bituminosas de bajo coste con escorias de acería para países en desarrollo.
- Comparación de las características físicas, mecánicas y químicas de las escorias de horno de arco eléctrico y horno cuchara de diferentes empresas productoras.
- Evaluación del envejecimiento por contacto con el ambiente de las escorias de horno cuchara.
- Estabilización de suelos de baja calidad con escorias de horno cuchara.
- Desarrollo de pavimentos de hormigón con escorias de horno de arco eléctrico y escorias de horno cuchara.
- Estudio de los lixiviados de las escorias de acería en diferentes mezclas bituminosas.
- Evaluación de las propiedades resistentes de las mezclas bituminosas con escorias de acería a través de ensayos de fatiga.
- Evaluación de diferentes subproductos industriales para su uso en infraestructuras viarias.

8. Bibliografía

1. Shi, X.; Mukhopadhyay, A.; Zollinger, D.; Grasley, Z. Economic input-output life cycle assessment of concrete pavement containing recycled concrete aggregate. *J. Clean. Prod.* **2019**, *225*, 414–425.
2. Arabani, M.; Azarhoosh, A.R. The effect of recycled concrete aggregate and steel slag on the dynamic properties of asphalt mixtures. *Constr. Build. Mater.* **2012**, *35*, 1–7.
3. Plati, C. Sustainability factors in pavement materials, design, and preservation strategies: A literature review. *Constr. Build. Mater.* **2019**, *211*, 539–555.
4. Amin, M.; Khan, K.; Saleem, M.; Khurram, N.; Niazi, M. Influence of Mechanically Activated Electric Arc Furnace Slag on Compressive Strength of Mortars Incorporating Curing Moisture and Temperature Effects. *Sustainability* **2017**, *9*, 1178.
5. Pérez-Martnez, P.J. Energy consumption and emissions from the road transport in Spain: A conceptual approach. *Transport* **2012**, *27*, 383–396.
6. Turk, J.; Mauko Pranjić, A.; Mladenovič, A.; Cotič, Z.; Jurjavčič, P. Environmental comparison of two alternative road pavement rehabilitation techniques: Cold-in-place-recycling versus traditional reconstruction. *J. Clean. Prod.* **2016**, *121*, 45–55.
7. Morsetto, P. Targets for a circular economy. *Resour. Conserv. Recycl.* **2020**, *153*, 104553.
8. Menaria, Y.; Sankhla, R. Use of Waste Plastic in Flexible Pavements-Green Roads. *Open J. Civ. Eng.* **2015**, *05*, 299–311.
9. Al-Busaltan, S.; Al Nageim, H.; Atherton, W.; Sharples, G. Green Bituminous Asphalt relevant for highway and airfield pavement. *Constr. Build. Mater.* **2012**, *31*, 243–250.
10. Jin, R.; Li, B.; Zhou, T.; Wanatowski, D.; Piroozfar, P. An empirical study of perceptions towards construction and demolition waste recycling and reuse in

- China. *Resour. Conserv. Recycl.* **2017**, *126*, 86–98.
11. Demirbas, A. Waste management, waste resource facilities and waste conversion processes. *Energy Convers. Manag.* **2011**, *52*, 1280–1287.
 12. Anthonissen, J.; Van den bergh, W.; Braet, J. Review and environmental impact assessment of green technologies for base courses in bituminous pavements. *Environ. Impact Assess. Rev.* **2016**, *60*, 139–147.
 13. Zheng, X.; Easa, S.M.; Ji, T.; Jiang, Z. Incorporating uncertainty into life-cycle sustainability assessment of pavement alternatives. *J. Clean. Prod.* **2020**, *264*, 121466.
 14. du Plessis, H.W.; Visser, A.T.; Curtayne, P.C. Fuel consumption of vehicles as affected by road-surface characteristics. In Proceedings of the ASTM Special Technical Publication; Publ by ASTM, **1990**; pp. 480–496.
 15. Nair Baskara, S.; Yaacob, H.; Hainin, M.R.; Hassan, S.A. Accident due to pavement condition – A review. *J. Teknol.* **2016**, *78*, 75–82.
 16. Tsubota, T.; Fernando, C.; Yoshii, T.; Shirayanagi, H. Effect of Road Pavement Types and Ages on Traffic Accident Risks. In Proceedings of the Transportation Research Procedia; Elsevier B.V., **2018**; Vol. 34, pp. 211–218.
 17. Rodríguez-Fernández, I.; Lizasoain-Arteaga, E.; Lastra-González, P.; Castro-Fresno, D. Mechanical, environmental and economic feasibility of highly sustainable porous asphalt mixtures. *Constr. Build. Mater.* **2020**, *251*, 118982.
 18. Lastra-González, P.; Calzada-Pérez, M.A.; Castro-Fresno, D.; Vega-Zamanillo, Á.; Indacochea-Vega, I. Comparative analysis of the performance of asphalt concretes modified by dry way with polymeric waste. *Constr. Build. Mater.* **2016**, *112*, 1133–1140.
 19. Sangiorgi, C.; Lantieri, C.; Dondi, G. Construction and demolition waste recycling: An application for road construction. *Int. J. Pavement Eng.* **2015**, *16*, 530–537.
 20. Lori, A.R.; Hassani, A.; Sedghi, R. Investigating the mechanical and hydraulic characteristics of pervious concrete containing copper slag as coarse aggregate.

- Constr. Build. Mater.* **2019**, *197*, 130–142.
21. Lokesh, Y. *Study On the Effect of Stone, Dust, Ceramic Dust and Brick Dust as Fillers on the Strength, Physical and Durability Properties of Bituminous Concrete (BC-II) Mix*; **2018**; Vol. 13;.
 22. Kalantar, Z.N.; Karim, M.R.; Mahrez, A. A review of using waste and virgin polymer in pavement. *Constr. Build. Mater.* **2012**, *33*, 55–62.
 23. Zakaria, N.M.; Hassan, M.K.; Ibrahim, A.N.H.; Rosyidi, S.A.P.; Yusoff, N.I.M.; Mohamed, A.A.; Hassan, N. The use of mixed waste recycled plastic and glass as an aggregate replacement in asphalt mixtures. *J. Teknol.* **2018**, *80*, 79–88.
 24. Song, W.; Huang, B.; Shu, X. Influence of warm-mix asphalt technology and rejuvenator on performance of asphalt mixtures containing 50% reclaimed asphalt pavement. *J. Clean. Prod.* **2018**, *192*, 191–198.
 25. Fakhri, M.; Javadi, S.; Sedghi, R.; Arzjani, D.; Zarrinpour, Y. Effects of deicing agents on moisture susceptibility of the WMA containing recycled crumb rubber. *Constr. Build. Mater.* **2019**, *227*, 116581.
 26. Escorias de Acería de Horno de Arco Eléctrico | CEDEX Available online: <http://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/25/escorias-de-aceria-de-horno-de-arco-electrico/> (accessed on Oct 31, 2020).
 27. Motz, H.; Geiseler, J. Products of steel slags an opportunity to save natural resources. *Waste Manag. Ser.* **2000**, *1*, 207–220.
 28. Pioro, L.; Pioro, I. Reprocessing of metallurgical slag into materials for the building industry. *Waste Manag.* **2004**, *24*, 371–379.
 29. Dippenaar, R. Industrial uses of slag (the use and re-use of iron and steelmaking slags). *Ironmak. Steelmak.* **2005**, *32*, 35–46.
 30. Tsakiridis, P.E.; Papadimitriou, G.D.; Tsivilis, S.; Koroneos, C. Utilization of steel slag for Portland cement clinker production. *J. Hazard. Mater.* **2008**, *152*, 805–811.
 31. Adolfsson, D.; Engström, F.; Robinson, R.; Björkman, B. Cementitious Phases in Ladle Slag. *steel Res. Int.* **2011**, *82*, 398–403.

32. Shi, C. Characteristics and cementitious properties of ladle slag fines from steel production. *Cem. Concr. Res.* **2002**, *32*, 459–462.
33. Lam, M.N.T.; Jaritngam, S.; Le, D.H. Roller-compacted concrete pavement made of Electric Arc Furnace slag aggregate: Mix design and mechanical properties. *Constr. Build. Mater.* **2017**, *154*, 482–495.
34. Lam, M.N.T.; Le, D.H.; Jaritngam, S. Compressive strength and durability properties of roller-compacted concrete pavement containing electric arc furnace slag aggregate and fly ash. *Constr. Build. Mater.* **2018**, *191*, 912–922.
35. Kavussi, A.; Qazizadeh, M.J. Fatigue characterization of asphalt mixes containing electric arc furnace (EAF) steel slag subjected to long term aging. *Constr. Build. Mater.* **2014**, *72*, 158–166.
36. Pasetto, M.; Baldo, N. Experimental evaluation of high performance base course and road base asphalt concrete with electric arc furnace steel slags. *J. Hazard. Mater.* **2010**, *181*, 938–948.
37. Ziaee, S.A.; Behnia, K. Evaluating the effect of electric arc furnace steel slag on dynamic and static mechanical behavior of warm mix asphalt mixtures. *J. Clean. Prod.* **2020**, *274*, 123092.
38. Motevalizadeh, S.M.; Sedghi, R.; Rooholamini, H. Fracture properties of asphalt mixtures containing electric arc furnace slag at low and intermediate temperatures. *Constr. Build. Mater.* **2020**, *240*, 117965.
39. Skaf, M.; Manso, J.M.; Aragón, Á.; Fuente-Alonso, J.A.; Ortega-López, V. EAF slag in asphalt mixes: A brief review of its possible re-use. *Resour. Conserv. Recycl.* **2017**, *120*, 176–185.
40. Wu, S.; Xue, Y.; Ye, Q.; Chen, Y. Utilization of steel slag as aggregates for stone mastic asphalt (SMA) mixtures. *Build. Environ.* **2007**, *42*, 2580–2585.
41. Pattanaik, M.L.; Choudhary, R.; Kumar, B. Clogging evaluation of open graded friction course mixes with EAF steel slag and modified binders. *Constr. Build. Mater.* **2018**, *159*, 220–233.
42. Zalnezhad, M.; Hesami, E. Effect of steel slag aggregate and bitumen emulsion

- types on the performance of microsurfacing mixture. *J. Traffic Transp. Eng. (English Ed.)* **2020**, *7*, 215–226.
43. Shanbara, H.K.; Ruddock, F.; Atherton, W. A laboratory study of high-performance cold mix asphalt mixtures reinforced with natural and synthetic fibres. *Constr. Build. Mater.* **2018**, *172*, 166–175.
 44. Sadeghian, M.; Latifi Namin, M.; Goli, H. Evaluation of the fatigue failure and recovery of SMA mixtures with cellulose fiber and with SBS modifier. *Constr. Build. Mater.* **2019**, *226*, 818–826.
 45. Amuchi, M.; Abtahi, S.M.; Koosha, B.; Hejazi, S.M.; Sheikhzeinoddin, H. Reinforcement of steel-slag asphalt concrete using polypropylene fibers. *J. Ind. Text.* **2015**, *44*, 526–541.
 46. Ortega-López, V.; Manso, J.M.; Cuesta, I.I.; González, J.J. The long-term accelerated expansion of various ladle-furnace basic slags and their soil-stabilization applications. *Constr. Build. Mater.* **2014**, *68*, 455–464.
 47. Manso, J.M.; Ortega-López, V.; Polanco, J.A.; Setién, J. The use of ladle furnace slag in soil stabilization. *Constr. Build. Mater.* **2013**, *40*, 126–134.
 48. Richardson, I.G.; Cabrera, J.G. The nature of C₃S₂H in model slag-cements. *Cem. Concr. Compos.* **2000**, *22*, 259–266.
 49. Akın Altun, İ.; Yılmaz, İ. Study on steel furnace slags with high MgO as additive in Portland cement. *Cem. Concr. Res.* **2002**, *32*, 1247–1249.
 50. Manso, J.M.; Rodríguez, Á.; Aragón, Á.; Gonzalez, J.J. The durability of masonry mortars made with ladle furnace slag. *Constr. Build. Mater.* **2011**, *25*, 3508–3519.
 51. Faraone, N.; Tonello, G.; Furlani, E.; Maschio, S. Steelmaking slag as aggregate for mortars: Effects of particle dimension on compression strength. *Chemosphere* **2009**, *77*, 1152–1156.
 52. Papayianni, I.; Anastasiou, E. Effect of granulometry on cementitious properties of ladle furnace slag. *Cem. Concr. Compos.* **2012**, *34*, 400–407.
 53. Rodríguez, Á.; Manso, J.M.; Aragón, Á.; Gonzalez, J.J. Strength and workability

- of masonry mortars manufactured with ladle furnace slag. *Resour. Conserv. Recycl.* **2009**, *53*, 645–651.
54. Papayianni, I.; Anastasiou, E. Production of high-strength concrete using high volume of industrial by-products. *Constr. Build. Mater.* **2010**, *24*, 1412–1417.
 55. Montenegro, J.M.; Celemín-Matachana, M.; Cañizal, J.; Setién, J. Ladle Furnace Slag in the Construction of Embankments: Expansive Behavior. *J. Mater. Civ. Eng.* **2013**, *25*, 972–979.
 56. Sun, D.D.; Tay, J.H.; Cheong, H.K.; Leung, D.L.K.; Qian, G. Recovery of heavy metals and stabilization of spent hydrotreating catalyst using a glass–ceramic matrix. *J. Hazard. Mater.* **2001**, *87*, 213–223.
 57. Rađenović, A.; Malina, J.; Sofilić, T. Characterization of Ladle Furnace Slag from Carbon Steel Production as a Potential Adsorbent. *Adv. Mater. Sci. Eng.* **2013**, *2013*, 198240.
 58. Montenegro-Cooper, J.M.; Celemín-Matachana, M.; Cañizal, J.; González, J.J. Study of the expansive behavior of ladle furnace slag and its mixture with low quality natural soils. *Constr. Build. Mater.* **2019**, *203*, 201–209.
 59. Ortega-López, V.; Fuente-Alonso, J.A.; Santamaría, A.; San-José, J.T.; Aragón, Á. Durability studies on fiber-reinforced EAF slag concrete for pavements. *Constr. Build. Mater.* **2018**, *163*, 471–481.
 60. Pasetto, M.; Baldo, N. Recycling of waste aggregate in cement bound mixtures for road pavement bases and sub-bases. *Constr. Build. Mater.* **2016**, *108*, 112–118.
 61. Bocci, E. Use of ladle furnace slag as filler in hot asphalt mixtures. *Constr. Build. Mater.* **2018**, *161*, 156–164.
 62. Skaf, M.; Ortega-López, V.; Fuente-Alonso, J.A.; Santamaría, A.; Manso, J.M. Ladle furnace slag in asphalt mixes. *Constr. Build. Mater.* **2016**, *122*, 488–495.
 63. Mao, X.; Wang, J.; Yuan, C.; Yu, W.; Gan, J. A Dynamic Traffic Assignment Model for the Sustainability of Pavement Performance. *Sustainability* **2018**, *11*, 170.

64. Zhang, H.; Hu, Z.; Hou, S.; Xu, T. Aging behaviors of bitumen degraded by the microbial consortium on bituminous pavement. *Constr. Build. Mater.* **2020**, *254*, 119333.
65. Loprencipe, G.; Pantuso, A.; Di Mascio, P. Sustainable Pavement Management System in Urban Areas Considering the Vehicle Operating Costs. *Sustainability* **2017**, *9*, 453.
66. Yuhong Wang, P.E.; Wen, Y.; Zhao, K.; Chong, D.; Wong, A.S.T. Evolution and locational variation of asphalt binder aging in long-life hot-mix asphalt pavements. *Constr. Build. Mater.* **2014**, *68*, 172–182.
67. Pranjić, I.; Deluka-Tibljaš, A.; Cuculić, M.; Šurdonja, S. Influence of pavement surface macrotexture on pavement skid resistance. In Proceedings of the Transportation Research Procedia; Elsevier B.V., **2020**; Vol. 45, pp. 747–754.
68. Zhang, W.; Yang, J.; Fan, X.; Yang, R.; Yu, B. Life-Cycle Cost Analysis of Base Course Using Cold In-Place Recycling: Case Study. In Proceedings of the Geo-Frontiers 2011; American Society of Civil Engineers: Reston, VA, **2011**; pp. 4428–4437.
69. Liu, M.H. Research and Application Prospect on Cold Recycling Technology of Asphalt Pavement. *Appl. Mech. Mater.* **2012**, *204–208*, 1909–1913.
70. Alkins, A.E.; Lane, B.; Kazmierowski, T. Sustainable Pavements: Environmental, Economic, and Social Benefits of In Situ Pavement Recycling. *Transp. Res. Rec.* **2008**, *2084*, 100–103.
71. Martnez-Echevarría, M.J.; Rubio, M.C.; Menendez, A. The reuse of waste from road resurfacing: Cold in-place recycling of bituminous pavement, an environmentally friendly alternative to conventional pavement rehabilitation methods. *WIT Trans. Ecol. Environ.* **2008**, *109*, 459–469.
72. Thenoux, G.; González, Á.; Dowling, R. Energy consumption comparison for different asphalt pavements rehabilitation techniques used in Chile. *Resour. Conserv. Recycl.* **2007**, *49*, 325–339.
73. Modarres, A.; Rahimzadeh, M.; Zarrabi, M. Field investigation of pavement

- rehabilitation utilizing cold in-place recycling. *Resour. Conserv. Recycl.* **2014**, *83*, 112–120.
74. Cross, S.A.; Chesner, W.H.; Justus, H.G.; Kearney, E.R. Life-Cycle Environmental Analysis for Evaluation of Pavement Rehabilitation Options. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* **2011**, *2227*, 43–52.
75. Euch Khay, S. El; Euch Ben Said, S. El; Loulizi, A.; Neji, J. Laboratory Investigation of Cement-Treated Reclaimed Asphalt Pavement Material. *J. Mater. Civ. Eng.* **2015**, *27*, 04014192.
76. Lee, K.W.; Brayton, T.E.; Mueller, M.; Singh, A. Rational Mix-Design Procedure for Cold In-Place Recycling Asphalt Mixtures and Performance Prediction. *J. Mater. Civ. Eng.* **2016**, *28*, 04016008.
77. Li, X.; Wen, H.; Edil, T.B.; Sun, R.; VanReken, T.M. Cost, energy, and greenhouse gas analysis of fly ash stabilised cold in-place recycled asphalt pavement. *Road Mater. Pavement Des.* **2013**, *14*, 537–550.
78. Kim, Y.; Lee, H. “David” Development of Mix Design Procedure for Cold In-Place Recycling with Foamed Asphalt. *J. Mater. Civ. Eng.* **2006**, *18*, 116–124.
79. Stimilli, A.; Ferrotti, G.; Graziani, A.; Canestrari, F. Performance evaluation of a cold-recycled mixture containing high percentage of reclaimed asphalt. *Road Mater. Pavement Des.* **2013**, *14*, 149–161.
80. Diefenderfer, B.K.; Bowers, B.F.; Apeageyi, A.K. Initial Performance of Virginia’s Interstate 81 In-Place Pavement Recycling Project. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* **2015**, *2524*, 152–159.
81. Maurer, G.; Bemanian, S.; Polish, P. Alternative Strategies for Rehabilitation of Low-Volume Roads in Nevada. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* **2007**, *1989–2*, 309–320.
82. Cox, B.C.; Howard, I.L.; Battey, R. In-Place Recycling Moisture-Density Relationships for High-Traffic Applications. In Proceedings of the IFCEE 2015; American Society of Civil Engineers: Reston, VA, **2015**; Vol. GSP 256, pp. 349–358.

83. Recasens, R.M.; Pérez Jiménez, F.E.; Aguilar, S.C. Mixed recycling with emulsion and cement of asphalt pavements. Design procedure and improvements achieved. *Mater. Struct.* **2000**, *33*, 324–330.
84. Wen, H.; Tharaniyil, M.P.; Ramme, B. Investigation of Performance of Asphalt Pavement with Fly-Ash Stabilized Cold In-Place Recycled Base Course. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* **2003**, *1819*, 27–31.
85. Mohd Hasan, M.R.; You, Z. Estimation of cumulative energy demand and green house gas emissions of ethanol foamed WMA using life cycle assessment analysis. *Constr. Build. Mater.* **2015**, *93*, 1117–1124.
86. Picado-Santos, L.G.; Capitão, S.D.; Dias, J.L.F. Crumb rubber asphalt mixtures by dry process: Assessment after eight years of use on a low/medium trafficked pavement. *Constr. Build. Mater.* **2019**, *215*, 9–21.
87. Zhang, K.; Luo, Y.; Chen, F.; Han, F. Performance evaluation of new warm mix asphalt and water stability of its mixture based on laboratory tests. *Constr. Build. Mater.* **2020**, *241*, 118017.
88. Oda, S.; Leomar Fernandes, J.; Ildefonso, J.S. Analysis of use of natural fibers and asphalt rubber binder in discontinuous asphalt mixtures. *Constr. Build. Mater.* **2012**, *26*, 13–20.
89. Bołtryk, M.; Falkowski, K.; Pawluczuk, E. A report on the fabrication of concrete pavement with the application of anionic bitumen emulsion. *Constr. Build. Mater.* **2017**, *154*, 1004–1014.
90. Vaitkus, A.; Andriejauskas, T.; Vorobjovas, V.; Jagniatinskis, A.; Fiks, B.; Zofka, E. Asphalt wearing course optimization for road traffic noise reduction. *Constr. Build. Mater.* **2017**, *152*, 345–356.
91. Donavan, P.R. Effect of Porous Pavement on Wayside Traffic Noise Levels. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* **2014**, *2403*, 28–36.
92. Hu, J.; Qian, Z.; Wang, D.; Oeser, M. Influence of aggregate particles on mastic and air-voids in asphalt concrete. *Constr. Build. Mater.* **2015**, *93*, 1–9.
93. Yan, K.; Sun, H.; You, L.; Wu, S. Characteristics of waste tire rubber (WTR) and

- amorphous poly alpha olefin (APAO) compound modified porous asphalt mixtures. *Constr. Build. Mater.* **2020**, *253*, 119071.
94. Jiang, W.; Sha, A.; Xiao, J.; Li, Y.; Huang, Y. Experimental study on filtration effect and mechanism of pavement runoff in permeable asphalt pavement. *Constr. Build. Mater.* **2015**, *100*, 102–110.
 95. Yan, B.; Mao, H.; Zhong, S.; Zhang, P.; Zhang, X. Experimental study on wet skid resistance of asphalt pavements in icy conditions. *Materials (Basel)*. **2019**, *12*.
 96. Ameri, M.; Hesami, S.; Goli, H. Laboratory evaluation of warm mix asphalt mixtures containing electric arc furnace (EAF) steel slag. *Constr. Build. Mater.* **2013**, *49*, 611–617.
 97. Kim, Y.; Lim, J.; Lee, M.; Kwon, S.; Hwang, S.; Lee, J. Comprehensive Evaluation of Warm SMA Using Wax-Based WMA Additive in Korea. *J. Test. Eval.* **2015**, *43*, 20130144.
 98. Wang, H.; Wang, Z. Evaluation of pavement surface friction subject to various pavement preservation treatments. *Constr. Build. Mater.* **2013**, *48*, 194–202.
 99. Li, B.; Zhang, C.; Xiao, P.; Wu, Z. Evaluation of coarse aggregate morphological characteristics affecting performance of heavy-duty asphalt pavements. *Constr. Build. Mater.* **2019**, *225*, 170–181.
 100. Esther, L.A.; Pedro, L.G.; Irune, I.V.; Gerardo, F. Comprehensive analysis of the environmental impact of electric arc furnace steel slag on asphalt mixtures. *J. Clean. Prod.* **2020**, *275*, 123121.

9. Artículos publicados

Los artículos publicados en revistas indexadas y derivados directamente de la investigación de la presente tesis, son los que se detallan a continuación.

Study of the Incorporation of Ladle Furnace Slag in the Manufacture of Cold In-Place Recycling with Bitumen Emulsion

Juan María Terrones-Saeta, Francisco Javier Iglesias-Godino, Francisco Antonio Corpas-Iglesias and Carmen Martínez-García

Materials 2020, 13(21), 4765; <https://doi.org/10.3390/ma13214765>

Development of Porous Asphalt with Bitumen Emulsion, Electric arc Furnace Slag and Cellulose Fibers for Medium Traffic Roads

Juan María Terrones-Saeta, Jorge Suárez-Macías, Francisco Javier Iglesias-Godino and Francisco Antonio Corpas-Iglesias

Minerals 2020, 10(10), 872; <https://doi.org/10.3390/min10100872>

Development of Slurry Surfacing with Electric Arc Furnace Slag for Pavements with Friction Problems

Juan María Terrones-Saeta, Jorge Suárez-Macías, Francisco Javier Iglesias-Godino and Francisco Antonio Corpas-Iglesias

Minerals 2020, 10(10), 878; <https://doi.org/10.3390/min10100878>

Evaluation of the Use of Electric Arc Furnace Slag and Ladle Furnace Slag in Stone Mastic Asphalt Mixes with Discarded Cellulose Fibers from the Papermaking Industry

Juan María Terrones-Saeta, Jorge Suárez-Macías, Francisco Javier Iglesias-Godino and Francisco Antonio Corpas-Iglesias

Metals 2020, 10(11), 1548; <https://doi.org/10.3390/met10111548>

Article

Study of the Incorporation of Ladle Furnace Slag in the Manufacture of Cold In-Place Recycling with Bitumen Emulsion

Juan María Terrones-Saeta *^{ID}, Francisco Javier Iglesias-Godino^{ID},
Francisco Antonio Corpas-Iglesias^{ID} and Carmen Martínez-García^{ID}

Department of Chemical, Environmental, and Materials Engineering, Higher Polytechnic School of Linares, University of Jaen, Scientific and Technological Campus of Linares, 23700 Linares, Spain; figodino@ujaen.es (F.J.I.-G.); facorpas@ujaen.es (F.A.C.-I.); cmartin@ujaen.es (C.M.-G.)

* Correspondence: terrones@ujaen.es; Tel.: +034-675-201-939

Received: 30 August 2020; Accepted: 23 October 2020; Published: 26 October 2020



Abstract: Cold in-place recycling with bitumen emulsion is a good environmental option for road conservation. The technique produces lower CO₂ emissions because the product is manufactured and spread in the same location as the previous infrastructure, and its mixing with bitumen emulsion occurs at room temperature. Adding materials with cementitious characteristics gives the final mixture greater resistance and durability, and incorporating an industrial by-product such as ladle furnace slag (of which cementitious characteristics have been corroborated by various authors) enables the creation of sustainable, resistant pavement. This paper describes the incorporation of ladle furnace slag in reclaimed asphalt pavements (RAP) to execute in-place asphalt pavement recycling with bitumen emulsion. Various test groups of samples with increasing percentages of emulsion were created to study both the density of the mixtures obtained, and their dry and post-immersion compressive strength. To determine these characteristics, the physical and chemical properties of the ladle furnace slag and the reclaimed asphalt pavements were analyzed, as well as compatibility with the bitumen emulsion. The aforementioned tests define an optimal combination of RAP (90%), ladle furnace slag (10%), water (2.6%), and emulsion (3.3%), which demonstrated maximum values for compressive strength of the dry and post-immersion bituminous mixture. These tests therefore demonstrate the suitability of ladle furnace slag for cold in-place recycling with bitumen emulsion.

Keywords: ladle furnace slag; reclaimed asphalt pavements; cold in-place recycling; simple compressive strength; bitumen emulsion; waste; circular economy

1. Introduction

The construction industry is one of the sectors with the greatest environmental impact [1], as well as being crucial for the development of a region's social welfare and economy. Civil constructions contribute to the progress of a population and the economic development of a nation. Building such constructions is therefore essential, even if large amounts of materials are consumed and the environment is affected [2,3].

A high proportion of the materials consumed by the construction of civil infrastructure projects are natural aggregates from nearby quarries. Taken together, the stages of extracting these natural aggregates and the binder used, transporting them to the factory, and designing the asphalt mix, generate a significant emission of greenhouse gases and a high environmental cost. Given the critical importance of roads and the current need to build them, the main countries involved in such infrastructure development stipulate regulations to mitigate environmental impacts throughout a road's life cycle [4,5].

The ideal solution—building high-quality structures while reducing environmental impact—requires techniques that are less damaging to the environment, including designing less-polluting processes for mixing the asphalt, and using waste from other industries in the development of road infrastructure [6]. All of these ideas are inherent in the so-called “circular economy,” a strategy to reduce consumption of virgin materials, optimize industrial processes, and ultimately reduce waste. The circular economy enables industries to close economic and ecological flows of resources.

Based on the above, and following the principles of the circular economy, a trend toward less-polluting techniques with a similar quality of results is essential for preserving road infrastructure. One of the best solutions is the recycling of asphalt pavement with bitumen emulsion.

Road pavement made with an asphalt mix has good strength, adhesion, and comfort for drivers, but these characteristics can decrease significantly at the end of its useful life. However, the aggregates' standardized and binding characteristics give the aged material quality for use in new asphalt mixes. Pavement aging is characterized by the formation of cracks of irregular shape and the loss of macroscopic adhesion for vehicles. Merely disposing of the aged pavement into landfill without any reuse wastes significant amounts of material, which is a strong negative environmental impact [7,8]. Ideally, mixtures would be developed that use this aged material to achieve the qualities required in the construction of the new infrastructure, reducing the use of new virgin materials in the construction of infrastructure, and of fossil fuels to produce and transport the new mixture [9,10]—in short, a lower emission of greenhouse gases and lower environmental impact. Some authors call this result sustainable pavement, thanks to the increase in the useful life of the infrastructure, and savings in terms of economic and environmental costs [11–13].

Lack of sustainability is a problem in the construction sector, albeit one which may slightly be mitigated through the reclamation of aged pavement to create a new asphalt mix. Disposing of the aged layer in landfill and producing a new asphalt mix should be rejected as an idea, due to its high impact on the environment and the contemporary imperative to optimize resources.

Various techniques have been used in this process. Every technique has its advantages and disadvantages, but each use all or part of the milled and aged road material.

These techniques are classified into two main types: hot and cold, depending on whether or not the asphalt mix is heated. In hot in-plant recycling, the road's aged asphalt mix is milled, transported to the manufacturing plant, mixed with virgin material, and manufactured at temperatures of 180 °C. It is then transported to the site of the infrastructure construction project, spread, and compacted. Unlike hot recycling, cold recycling is performed at room temperature, reducing the consumption of fossil fuels and the emission of CO₂ required in the heating of the mixture. Cold central plant pavement recycling-based processes follow implementation stages similar to those of hot recycling. One difference is the much lower temperature, cold in-place recycling does not require transportation of the milled mixture to a manufacturing plant, and the new mix is manufactured with 100% of the aged pavement reused in the new infrastructure [14].

Cold in-place recycling, on which this study is based, has a number of obvious advantages over other techniques. Environmental advantages include the reduced transport by heavy vehicles, lower CO₂ emissions, and a lower consumption of fossil fuels. Operational advantages include [15,16] low traffic influence, the maintenance of road geometry, a high pace of construction, and safety. These advantages stem mainly from the efficient practices involved in the execution of all pavement manufacturing operations, from milling and mixing with emulsion, water, and other additives to spreading and compaction.

Based on the above, cold in-place recycling with bitumen emulsion decreases the environmental impact, mainly due to a reduced extraction of virgin materials, and less use of machinery in the transport and manufacture of the asphalt mix. These improvements significantly reduce the emission of greenhouse gases such as CO₂ and NO_x [17].

Recycling pavement also has some disadvantages that must be taken into account during design. Firstly, not all pavements can be recycled; some pavements have suffered plastic deformation and are not recommended for regeneration, as the problems are likely to re-impact the new pavement created. Furthermore, since the new recycled pavement with bitumen emulsion is manufactured, curing time is required to achieve optimal mechanical properties. Therefore, even if it is permissible to open the road to traffic after the reclamation of the pavement, sufficient time is required before the final mechanical characteristics are obtained [18]. It is therefore essential to choose a bitumen emulsion compatible with both the material to be treated, and the expected breaking and curing times.

Secondly, the difficulty of reproducing the final characteristics of the projected pavement in the laboratory [19,20], variability of materials, and the dependence on proper execution make it difficult to determine the final behavior of the cold in-place recycling mix in advance, thus limiting its use to low traffic-volume roads [21].

In several cases, however, proper laboratory study and accurate execution of the technique has led to the creation of pavement with characteristics notably better than expected, producing a sustainable mix with good mechanical characteristics, even for high traffic [22–24]. Additives such as cement [25], and even industrial by-products such as fly ash from coal-fired thermal plants [26], have been used with good results.

Based on the preceding research, obtaining optimal mechanical characteristics in cold in-place recycling with bitumen emulsion requires the incorporation of an additive with cementitious characteristics to achieve three goals: proper pavement strength during the curing time; granulometric adjustment of the reclaimed asphalt pavement; and material that maximizes final resistance of the mix. This project therefore uses ladle furnace slag as a grading corrector and additive to improve mechanical qualities in the short and long term.

The ladle furnace slag comes from the steel industry. It is a by-product of the process of obtaining quality steel from scrap steel—more specifically, from the refining stage. In the first stage of meltdown performed in an electric arc furnace, oxidation eliminates manganese and silicon and achieves dephosphorization, creating a foamed slag in which all the dross accumulates. These slags are called electric arc furnace slags. The subsequent refining stage is for the removal of metal oxides, desulfurization, and decarbonization of the steel [27]. The main purpose of the refining stage is to obtain steel with a low oxygen and sulfur content, so the refining furnace or ladle furnace is fed with melted liquid from the previous stage and then covered with a reduction slag that is formed of lime, fluorspar, coke or graphite in appropriate amounts. Deoxidation is achieved by simple contact of the molten liquid with the slag. Full deoxidation occurs, however, through the addition of silicon and manganese ferroalloys, leading to liquid particles retained in the slag forming in the metal bath. Desulfurization minimizes the amount of sulfur in steel thanks to the presence of calcium oxide and carbon. This process produced the ladle furnace slag used in this project in a portion of 20–30 kg per final ton of steel. Although the proportion is lower than that obtained in the production of electric arc furnace slag, the landfill of ladle furnace slag produces serious environmental problems due to its chemical composition and small particle size.

Unlike electric arc furnace slags, with resistant characteristics, angularity, and hardness making them ideal substitutes for virgin aggregate in road infrastructure diversity (mainly in asphalt mix), ladle furnace slag has not been reused abundantly in the creation of new materials [28–31]. Ladle furnace slags have a fine grading which is suitable for various purposes [32,33]—among them, the addition to reclaimed asphalt pavements for the execution of cold in-place recycling with bitumen emulsion, the focus of this project. The presence of some metal oxides can cause volumetric expansion of the material when hydrated, however, and laboratory monitoring was required during the study [34,35].

Among the few applications of ladle furnace slag is its addition to cement [36,37], as a substitute for sand in cement mortars [38–41], as a replacement in concrete [42], and as a stabilizer of clayey materials due either to its high lime content [43] or its treatment of water [44,45]. Its appropriateness

as a material with cementitious characteristics has been confirmed by the success stories involving its addition to cements, mortars, and concretes.

On the other hand, the use of ladle furnace slag in pavements has been limited, and only practiced at the research level. In the incorporation of the slags into low quality soils for its stabilization [46], acceptable results were obtained, with no problems of expansiveness in the treated material, and an improved quality of the soil. In turn, ladle furnace slags were used for the manufacture of concrete pavements [47], reflecting adequate strengths after testing, and even used as road bases, or subbases [48]. In the field of hot mix asphalt, research has been carried out in which the filler was replaced by ladle furnace slag [49], obtaining good properties of rigidity, tensile splitting strength and resistance to repeated loads. At the same time, the substitution of a high proportion of calcareous aggregates by slags in warm mix asphalt [50] showed a considerable improvement in mechanical properties compared with a traditional bituminous mix. Finally, the development of porous asphalt with ladle furnace slag and bitumen [51] showed excellent adhesion of the bitumen with the slag, resulting in good mechanical properties. However, there is no research referring to the use of ladle furnace slag in bituminous mixtures with bitumen emulsion and reclaimed asphalt pavements (RAP), the process developed in this research.

Based on the above, this study analyzed cold in-place recycling with bitumen emulsion and the incorporation of ladle furnace slag as an additive to improve grading and to provide special characteristics of resistance. The study therefore explored the use of industrial by-products as a substitute for virgin material, and also to lengthen the life cycle of a pavement. In addition to reducing the use of virgin materials in the formation of the asphalt mix, use of cold in-place techniques significantly decrease greenhouse gas emissions and fossil fuel consumption. This project sought to optimize the use of resources and manufacturing techniques, while reducing industrial waste. The study was therefore performed within the framework of a circular economy.

Regulations for studying the suitability of cold in-place recycling not only vary by country, but are somewhat inaccurate and depend on the empirical conditions of sampling, compaction, and testing [52]. Given the proliferation of such techniques in Spain for over 30 years, and the success achieved in their implementation, this study follows the Spanish regulations outlined in Circular 8/2001 [53], which provides a series of warnings concerning the treatment of materials and a series of standardized tests to be performed to achieve results that conform to the various minimum values established.

This regulation was applied for the in-place implementation of a bituminous mixture with bitumen emulsion, ladle furnace slag and milled pavement as the most superficial layer. Subsequently, a bituminous mixture reduced in thickness was applied on this pavement, which would improve the friction of a tyre with the road and provide a comfortable and safe wearing layer.

2. Materials and Methods

This section details the starting materials and the methodology used to study the suitability of in-place recycling of asphalt pavement with bitumen emulsion, using ladle furnace slag as an additive.

2.1. Materials

The following subsections detail the materials used in this study, highlighting their nature and origin, as well as specific noteworthy characteristics.

2.1.1. Reclaimed Asphalt Pavements

The reclaimed asphalt pavement came from the surface layer of the road joining the towns of Linares and Jabalquinto, located in Spanish territory. The road on which the pavement was located had a medium volume of heavy-vehicle traffic, and the surface layer was cracked with an irregular shape. This cracking reflected structural depletion of the layer due to aging of the bitumen. The layer did not, however, show significant deformation due to poor design of the initial mix or poor execution of the subgrade. The pavement composed of hot mix asphalt was milled with machinery similar to

that which would be used on-site, to obtain an appropriate sample for study. The tests performed to confirm the pavement's suitability for recycling are detailed in the methodology.

2.1.2. Bitumen Emulsion

Bitumen emulsion plays a key role in achieving the mechanical and durability characteristics of the final asphalt mix. As an element to bond the various particles of the reclaimed asphalt pavements and the ladle furnace slag, bitumen emulsion can provide the asphalt mix with both tensile strength and durability.

Choosing the right bitumen emulsion was essential for a variety of reasons, including achieving adequate adhesivity between the aggregates and the bitumen emulsion, and breaking and coating times suitable for execution on-site. To achieve these properties, a slow-breaking bitumen emulsion must be used, since longer breaking time favors coating of the reclaimed asphalt pavements particles. To achieve chemical compatibility between aggregates, reclaimed asphalt pavements, and ladle furnace slag, a cationic emulsion with characteristics appropriate to the nature of ladle furnace slag was chosen; this emulsion did not cause problems in the coating of the reclaimed asphalt pavements. European regulations label this emulsion C60B5 REC. Table 1 lists its technical characteristics.

Table 1. Technical details of the bitumen emulsion C60B5 REC.

Characteristics	Unit	Standard	Min.	Max.
Original Emulsion				
Particle polarity	-	UNE EN 1430 [54]	Positive	
Breaking value	g	UNE EN 13075-1 [55]	170	
Binder content (per water content)	%	UNE EN 12846-1 [56]	58	62
Efflux time (2 mm, 40 °C)	s	UNE EN 12,846 [57]	15	70
Residue on sieving (0.5 mm)	%	UNE EN 1429 [58]	-	0.10
Setting tendency (7 days storage)	%	UNE EN 12,847 [59]	-	10
Water effect of binder adhesion	%	UNE EN 13,614 [60]	90	-
Binder after Distillation (UNE EN 1431 [61])				
Penetration (25 °C; 100 g; 5 s)	0.1mm	UNE EN 1426 [62]	-	270
Softening point	°C	UNE EN 1427 [63]	35	-
Evaporation Residue (UNE EN 13074-1 [64])				
Penetration (25 °C; 100 g; 5 s)	0.1mm	UNE EN 1426 [62]	-	330
Softening point	°C	UNE EN 1427 [63]	35	-
Stabilizing Residue (UNE EN 13074-2 [65])				
Penetration (25 °C; 100 g; 5 s)	0.1mm	UNE EN 1426 [62]	-	270
Softening point	°C	UNE EN 1427 [63]	35	-

2.1.3. Ladle Furnace Slag

The ladle furnace slag used in this study came from the steel manufacturing industry. As mentioned above, ladle furnace slag is found in steel refining or ladle furnaces. The sample was taken representatively, such that it contained all particle sizes typical of the unaltered by-product. The following sections detail the tests performed to characterize and study the by-product.

2.2. Methodology

A clear, objective methodology was used to confirm the suitability of the mechanical and resistance-related characteristics produced by cold in-place recycling with bitumen emulsion and ladle furnace slag.

Firstly, both of the starting materials, reclaimed asphalt pavement and ladle furnace slag, were analyzed to determine their physical, chemical, and mechanical characteristics. Consideration was given to differences in the materials, as well as to the role each played in the final asphalt mix.

Individualized study best determined the critical characteristics that could pose problems in executing the job.

After analyzing the properties of the various materials and their suitability for use in asphalt pavement recycling, the different specimen families were manufactured. Firstly, however, the percentages of each material to be added—reclaimed asphalt pavement, bitumen emulsion, ladle furnace slag, and water—was determined.

It should be noted that the mixing sequence was as follows: first, the pavement was milled and added to the ladle furnace slag; secondly, the appropriate percentage of pre-coating water was incorporated to facilitate the mixing process; and finally, the bitumen emulsion was added by re-mixing to achieve a homogeneous mix of materials.

According to Spanish Circular 8/2001 [53], these percentages were determined through a series of steps outlined in the NLT-389/00 [66] standard. This regulation primarily describes the grading envelope for in-place recycling with bitumen emulsion. The grading curve obtained by combining different percentages of the recycled asphalt pavement and ladle furnace slag must be contained in the grading envelope. After defining the percentages of each material, the percentages of fluids (bitumen emulsion and pre-coating water) required for the final mix were identified. NLT-389/00 [66] establishes the margins for both materials, and the addition of fluids varied based on these margins. These margins are determined by the UNE 103,501 [67] Modified Proctor Compaction Test and the NLT-196/84 [68] test for bitumen coating. Only in this way could a final mix with the greatest resistance be created, due to the higher density determined by the Modified Proctor Compaction Test. Good mechanical characteristics depend on the coating and adhesion of the aggregates with the emulsion, which was quantified by the Coating Test.

After determining the percentage of each material to be added to obtain the different families, the same tests were performed: simple compression strength NLT-161/98 [69] and immersion-compression NLT-162/00 [70].

With the data obtained from dry and post-immersion resistance, as well as preserved resistance, the optimal formula for the job was calculated mathematically, providing a glimpse of the mechanical characteristics of this job mix formula to be verified later.

The following defines the steps detailed in each section.

2.2.1. Analysis of Starting Materials

Industrial by-products have an environmental advantage over virgin materials, as using the former reduces the environmental impact by decreasing the extraction rate of other materials. These by-products must be studied in detail, however, as most have special characteristics that could cause revalorization to fail.

Among the by-products used in this study, reclaimed asphalt pavement was studied to determine its physical, chemical, and mechanical characteristics. Firstly, particle size was analyzed using the test UNE-EN 933-1 [71], to assess suitability for the grading envelope stipulated by this standard, as well as the percentage of ladle furnace slag to be added. After analyzing particle size, the binder and coarse and fine aggregates were separated according to UNE-EN 12697-1 [72]. The aged binder was then studied through the UNE-EN 1426 [62] penetration and UNE-EN 1427 [63] softening point tests, to evaluate the aging point of the binder. Next, since the coarse aggregate of the reclaimed asphalt pavement is responsible for providing mineral skeleton to the mix, the following tests are compulsory: determination of resistance to fragmentation, UNE-EN 1097-2 [73]; determination of percentage of crushed and broken surfaces in coarse aggregate particles, UNE-EN 933-5 [74]; and flakiness index, UNE-EN 933-3 [75]. The fine aggregate was tested using the sand equivalent test UNE-EN 933-8 [76] and the plasticity index (UNE 103,103 [77] and UNE 103,104 [78]) to identify the presence of clay elements that could impair the mix.

Next, the ladle furnace slag was studied chemically and physically. An X-ray fluorescence test provided the elemental composition of the sample, enabling evaluation of its chemical aptitude for the

final mix and expected cement characteristics, as well as chemical elements that could pose problems in the mixture once the road is finished.

The physical properties were then evaluated through particle size analysis, UNE-EN 933-1 [71], a determination of particle density, UNE-EN 1097-7 [79], and the bulk density of filler in kerosene, UNE-EN 1097-3 [80]. These typical civil engineering tests are essential in the study of waste, because variation from the density of the usual virgin material necessitates appropriate volumetric corrections. As with the fine aggregate, the material's plasticity was analyzed (UNE 103,103 [77] and 103,104 [78]) to prevent it from impairing the final mix due to expansivity problems.

2.2.2. Manufacture of the Different Sample Families and Tests

After analyzing the starting materials and evaluating their suitability for cold in-place recycling with bitumen emulsion, the corresponding grading curve was adjusted by adding the ladle furnace slag to the reclaimed asphalt pavement. The grading curve obtained by combining the two materials must conform to the grading envelope defined by Circular 8/2001 [53], more specifically RE2. The type of mix (RE2) was chosen for its reduced layer thickness, and thus its more suitable mechanical characteristics.

Once the combination percentage of reclaimed asphalt pavement and ladle furnace slag was determined, the percentages for the addition of fluids (bitumen emulsion and precoat water) were studied. Following the NLT-389/00 [66] standard, we first calculated the Theoretical Content of Fluids (TCF), that is, the percentage of optimal humidity obtained from the Modified Proctor Compaction test UNE 103,501 [67] for combining reclaimed asphalt pavement and ladle furnace slag. The value is the reference for the percentage of precoat water, plus the percentage of bitumen emulsion that must be added to the aggregates to achieve maximum density and approximate highest resistance.

The definitive percentage, termed Optimal Fluid Content (OFC), was determined by performing several coating tests with different percentages of precoat water, while keeping the emulsion percentage constant. This procedure should produce a total fluid content (water plus emulsion) ranging from TCF–2% to TCF. The coating test was performed in accordance with NLT-196/84 [68], adding no calcium carbonate and only the combined reclaimed asphalt pavement and ladle furnace slag, as well as the emulsion and precoat water stipulated. A coating test then evaluated the suitability of the emulsion in combination with the aggregates, enabling selection of the percentage corresponding to the Optimal Fluid Content (OFC). This value had to be between TCF–1% and TCF%.

Following the determination of the Optimal Fluid Content (OFC), the percentages of precoat water and bitumen emulsion for the different families were determined, based on the knowledge that the emulsion percentage should be within a range of 2.5–4%. Three families were created with different percentages of bitumen emulsion-to-aggregate (recovered asphalt pavement plus ladle kiln slag) of 3%, 3.5% and 4%. Each percentage of emulsion corresponded to a percentage of precoat water equal to the difference between the Optimum Fluid Content (OFC) and the percentages of emulsion.

After determining the composition of the different families, 12 samples were manufactured for each family, designed according to the norm, NLT-161/98 [69]. The compaction process according to the detailed standard consisted of: first, pouring the bituminous mixture into standardized molds; next, an initial load of 1 MPa was then applied; finally, a load of 21 MPa was applied over a time of 2 to 3 min at constant speed. After manufacturing, these samples had to be cured in a forced air oven at 50 ± 2 °C until they reached constant mass, for no less than 3 days and not more than 7 days.

Upon completion of this process, maximum density, UNE-EN 12697-5 [81], and bulk density of the specimens, UNE-EN 12697-6 [82], as well as the void content, UNE-EN 12697-8 [83], of the different families was determined. The goal was to divide each family into two groups to study the effect of water on cohesion of the compacted asphalt mix (immersion-compression test NLT-162/00 [70]). A group from each family was subjected to the action of water to study cohesion. The samples were submerged in a water bath regulated at 49 ± 1 °C for 4 days and then tested following NLT-161/98 [69] to evaluate the difference in resistance between the sample subjected to the action of the water and the sample kept dry.

2.2.3. Determination of the Optimal Job Mix Formula

Once the results for densities, dry resistance, post-immersion resistance, and preserved resistance were obtained for the different families, they were evaluated mathematically and graphically to obtain maximum dry and post-immersion resistance results. These values had to be higher than the minimums stipulated in Circular 8/2001 [53]—a dry resistance value of 3 MPa and post-immersion resistance of 2.5 MPa. Once the maximum and expected resistance values were calculated by mathematical correlation, the specimen family was created with the optimal job mix formula in order to corroborate the approximate values. Ultimately, once resistance was confirmed, this step yielded the ideal combination of reclaimed asphalt pavement, ladle furnace slag, bitumen emulsion, and water to manufacture cold in-place recycled pavement.

It should be noted that the optimum combination of materials was obtained through the dry resistance test because it is the test that is most limited by the regulations, and which also best characterizes the bituminous mixture, as it provides the resistance of this structural course.

3. Results and Discussions

The following subsections present the results of the methodology described above.

3.1. Results of the Analysis of the Starting Materials

Particle size of the reclaimed asphalt pavement was analyzed to study its grading curve. This analysis enabled the adjustment of the percentage of ladle furnace slag added, to comply with the grading envelope established in the regulations. Figure 1 displays the results of the particle size analysis and the correspondence of the particle size distribution obtained for the reclaimed asphalt pavement to the RE2 grading envelope stipulated by Circular 8/2001 [53].

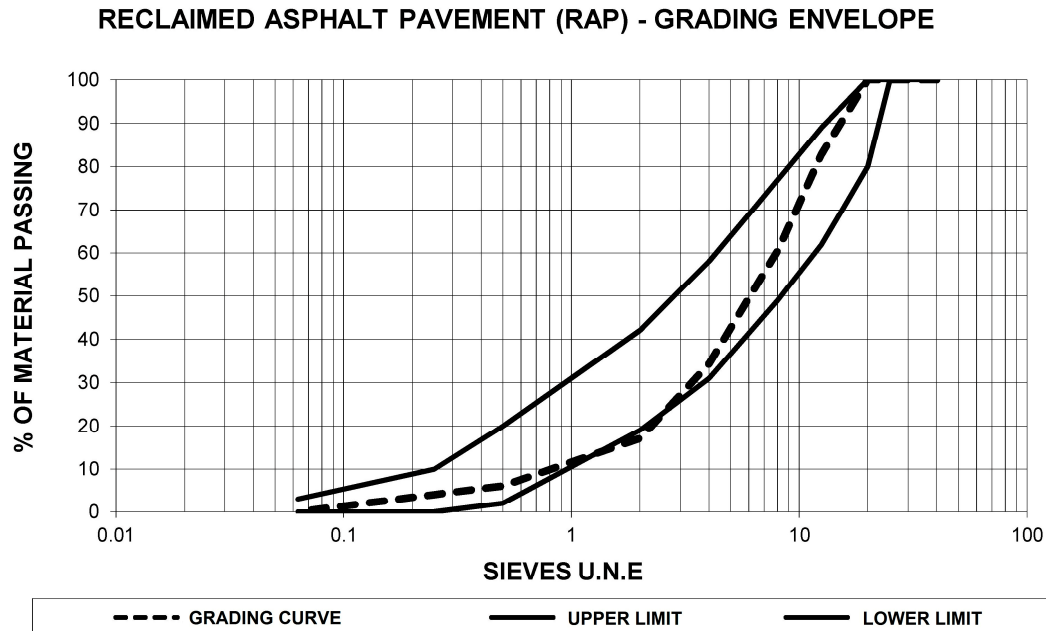


Figure 1. Graph of the grading curve of reclaimed asphalt pavement referenced to the RE2 grading envelope of Circular 8/2001 [53].

As Figure 1 shows, the grading curve of the reclaimed asphalt pavement reflects a majority composition of coarse aggregate, with a maximum size of less than 20 mm. Furthermore, the low proportion of fine aggregate led to the addition of ladle furnace slag adjusting the grading curve to the established grading envelope, as well as to reveal its cementitious characteristics.

Once the binder was extracted from the reclaimed asphalt pavement, separation of the aggregate enabled determination of the existing amount of the binder in the aggregate as 4.3%. This percentage is common in semi-dense asphalt mix and continuous grading used for medium- or low-traffic roads. The extracted bitumen binder was then analyzed (see Table 2 for results).

Table 2. Tests of binder extracted from reclaimed asphalt pavement.

Test	Standard	Value/Unit
Penetration (25 °C; 100 g; 5 s)	UNE-EN 1426 [62]	7 ± 0 (1/10) mm
Softening point	UNE-EN 1427 [63]	88 ± 2 °C

The results for penetration and softening point confirmed expectations. The pavement had aged by exhaustion, causing the binder to mostly lose its elasticity and become excessively hard. It should be noted that the hardness values were also influenced by the type of bitumen used in the area from which the pavement was reclaimed, where very hard bitumen (type B 40/50) is used due to the warm climate.

Moreover, the aggregate extracted from the pavement, unmilled to avoid alteration, was analyzed to confirm its suitability. The results of the tests are detailed in Table 3.

Table 3. Tests of the coarse aggregate and fine aggregate of the reclaimed asphalt pavement.

Coarse Aggregate			
Test	Standard	Value/Unit	
Determination of percentage of crushed and broken surfaces	UNE-EN 933-5 [74]	93 ± 2%	
Flakiness index	UNE-EN 933-3 [75]	88 ± 2 °C	
Los Angeles Test method	UNE-EN 1097-2 [73]	19 ± 1%	
Fine Aggregate			
Test	Standard	Value/Unit	
Plasticity index	UNE 103103/UNE 103,104 [77,78]	2.9 ± 0.1%	
Sand equivalent	UNE-EN 933-8 [76]	79 ± 2%	

The results shown in Table 3 reflect a coarse aggregate of acceptable mechanical resistance and particle shape, more than adequate for use as aggregate in an asphalt mix for roads with intermediate traffic volume. The low plasticity index and sand equivalent value greater than 75 rule out the possible presence of clay particles that could cause problems due to expansiveness.

In line with the previous assumptions, reclaimed asphalt pavement can be classified as suitable for use in cold in-place recycling, but not without first correcting the grading through the addition of ladle furnace slag, and studying its compatibility with bitumen emulsion.

The ladle furnace slag was then analyzed elementally to detect its composition and to identify elements that could cause problems. Table 4 presents the results of the X-ray fluorescence.

The results show that the ladle furnace slag's composition derives directly from its nature and the production process, highlighting the percentages of calcium oxide so necessary for achieving primary resistance of the shaped mixture, and thus its suitability for supporting traffic. Percentages of silicon oxides are also necessary to achieve good cementitious characteristics over time.

The grading of the ladle furnace slag obtained in the physical tests is presented in Figure 2.

The results show a significant percentage of fine aggregates and a lower proportion of coarse aggregates, with a maximum aggregate size of 12.5 mm.

The remaining physical tests of density and plasticity for the fine portion of the ladle furnace slag are detailed in Table 5.

Table 4. Results of the X-ray fluorescence of ladle furnace slag.

Compound	wt, %	Est. Error
CaO	40.19	0.25
MgO	19.38	0.20
SiO ₂	12.49	0.17
Al ₂ O ₃	7.29	0.13
Fe ₂ O ₃	2.38	0.08
MnO	0.936	0.047
S	0.548	0.027
TiO ₂	0.486	0.024
BaO	0.240	0.012
Na ₂ O	0.118	0.042
Cr ₂ O ₃	0.1100	0.0055
Cl	0.0833	0.0042
SrO	0.0733	0.0037
ZnO	0.0681	0.0034
K ₂ O	0.0506	0.0025
ZrO ₂	0.0425	0.0021
V ₂ O ₅	0.0179	0.0017
P	0.0138	0.0012
CuO	0.0117	0.0010
NiO	0.0082	0.0011
PbO	0.0048	0.0010
Nb ₂ O ₅	0.0046	0.0006
MoO ₃	0.0028	0.0009
Co ₃ O ₄	0.0021	0.0009
SeO ₂	0.0012	0.0005

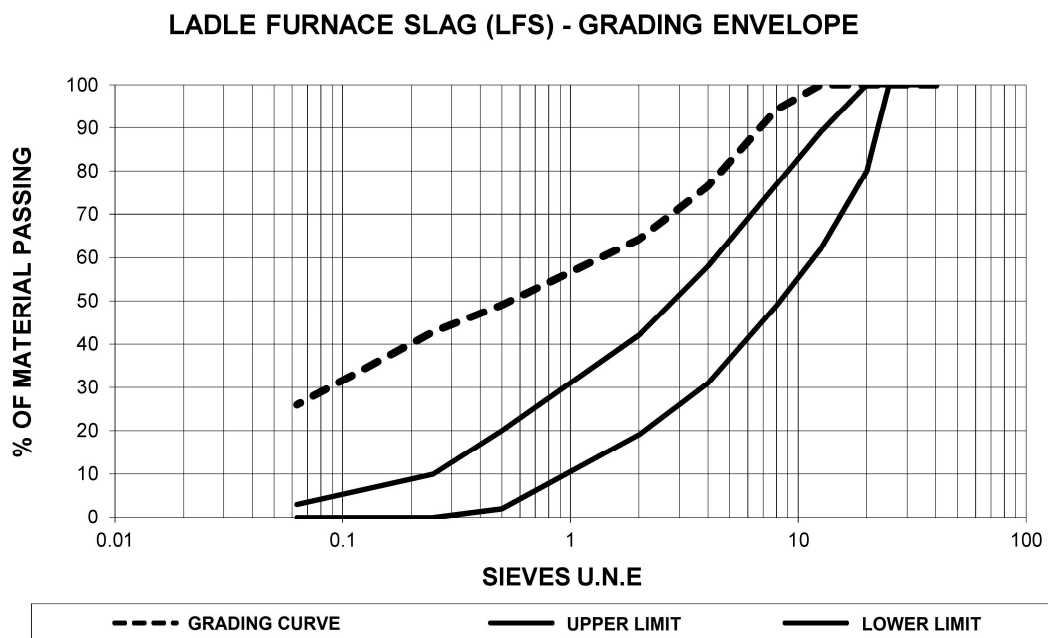


Figure 2. Graph of the grading curve of ladle furnace slag referenced to the RE2 grading envelope of Circular 8/2001 [53].

Table 5. Density and plasticity tests for the fine portion of ladle furnace slag.

Test	Standard	Value/Unit
Particle density	UNE-EN 1097-7 [79]	$2.71 \pm 0.07 \text{ t/m}^3$
Bulk density	UNE-EN 1097-3 [80]	$0.75 \pm 0.01 \text{ t/m}^3$
Plasticity index	UNE 103,103/UNE 103,104 [77,78]	No plasticity

Density values did not vary from those of typical virgin material filler; they showed a bulk density value of less than 0.8 t/m^3 , indicating non-pulverulent behavior that would not impair operability. Plasticity is clearly zero, as this material had a significant percentage of calcium oxide and silicon oxide.

Therefore, after the study of both materials, reclaimed asphalt pavement and ladle furnace slag, it can be concluded that both are suitable for use in new bituminous mixtures. The reclaimed asphalt pavement had aged bitumen, albeit with an acceptable quality of aggregate for its reuse, while the ladle furnace slag had a chemical composition suitable for the development of the expected cementitious characteristics, and a fine grain size ideal for combination with the reclaimed asphalt pavement.

3.2. Test Results of the Different Sample Families

Based on the particle size analysis of the reclaimed asphalt pavement and ladle furnace slag, the percentage of each element to be added was calculated to confirm achievement of the grading envelope stipulated in Circular 8/2001 [53], and to incorporate an adequate percentage of ladle furnace slag to produce the cementitious characteristics that make the pavement resistant. The proportion of elements in the combination was 90% reclaimed asphalt pavement and 10% ladle furnace slag, a percentage chosen based on detailed adjustments. Figure 3 displays the corresponding grading curve for the mixture of the two materials. In the following sections, aggregate will be used to indicate the combination of these materials in the percentages specified, with the bitumen emulsion and water percentages referring to the mass of the two together.

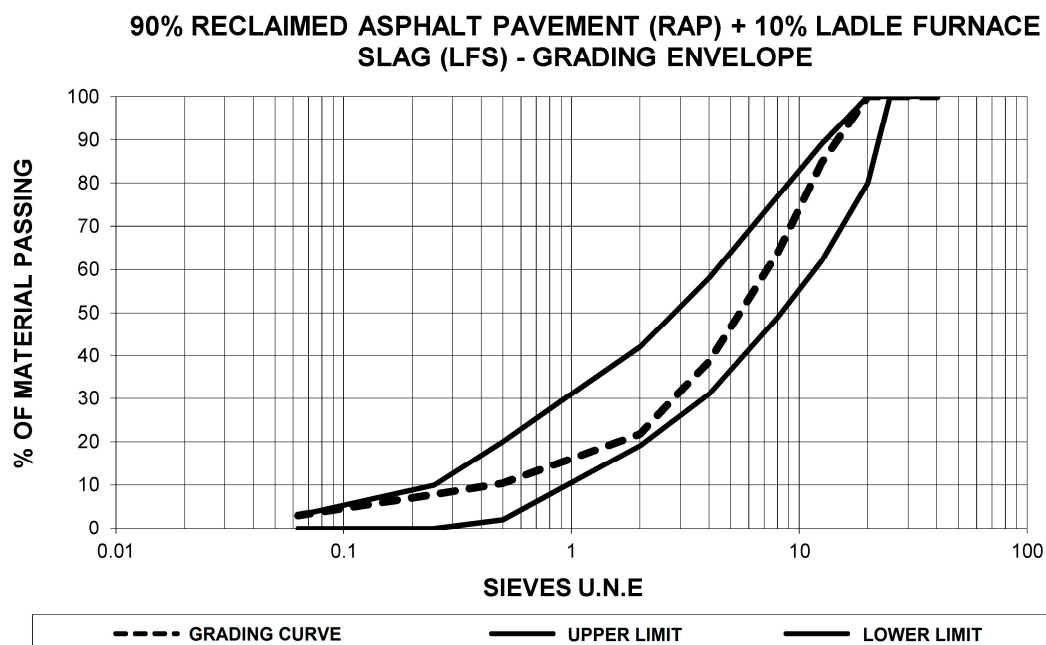


Figure 3. Graph of the grading curve for the combination of 90% reclaimed asphalt pavement and 10% ladle furnace slag, referenced to the RE2 grading envelope of Circular 8/2001 [53].

Once the percentage of the combined materials was determined, the Modified Proctor Compaction Test UNE 103,501 [67] was performed to determine the optimal humidity to obtain maximum compaction

density. Optimal humidity, also termed the Theoretical Content of Fluids (TCF), corresponds to precoating water plus emulsion.

The Modified Proctor Compaction Test was performed for water percentages of 0%, 2.5%, 5%, 7.5%, and 10% in the mixture, establishing a clear maximum density value (1.72 t/m^3) with a humidity of 5.9%. The results of the Proctor Test can be seen in Figure 4.

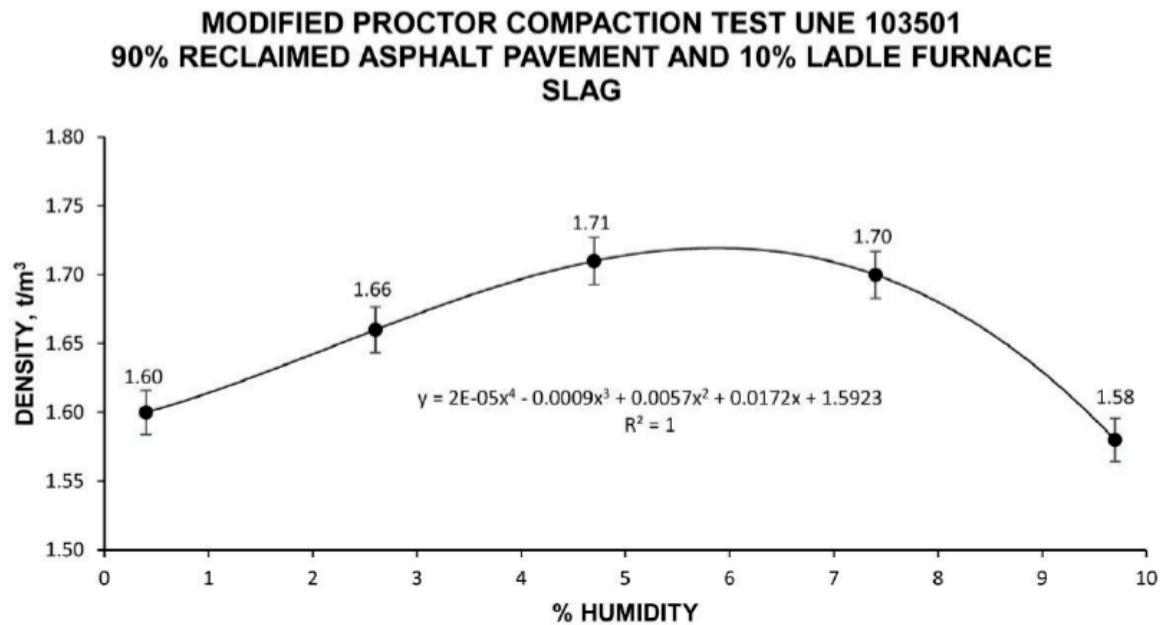


Figure 4. Graph of the Modified Proctor Compaction Test UNE 103,501 [67] for the combination of 90% reclaimed asphalt pavement and 10% ladle furnace slag.

After determining the Theoretical Content of Fluids (TCF) (5.9% to aggregate), Optimal Fluid Content (OFC) was calculated, starting with an essential test, the coating test NLT-196/84 [68]. An emulsion percentage of 3% to aggregate (reclaimed asphalt pavement plus ladle furnace slag) was established, as well as increasing percentages of precoating water from TCF–2% to TCF—that is, 0.9%, 1.9%, and 2.9% water-to-aggregate. Figure 5 presents images of adhesion of the emulsion with different percentages of precoating water.

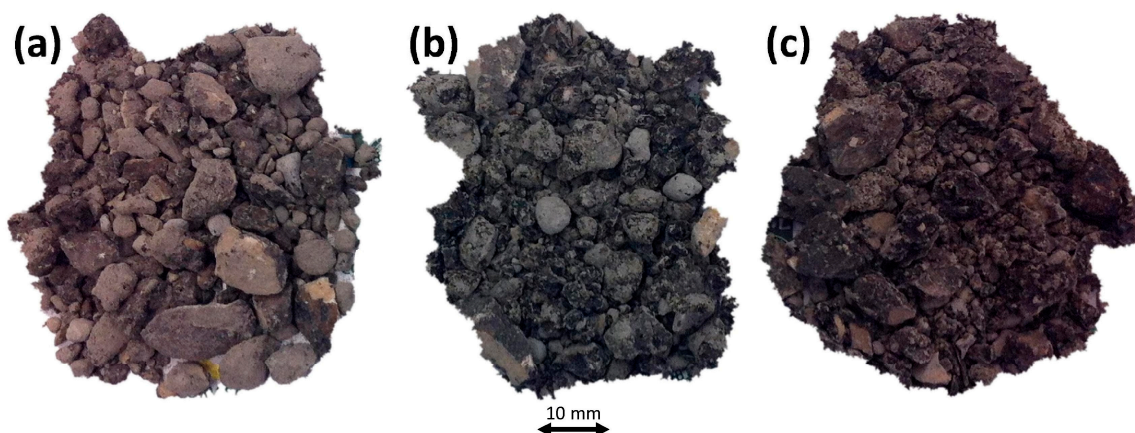


Figure 5. Coating Test NLT-196/84 [68] for reclaimed asphalt pavement, ladle furnace slag, and 3% emulsion with different percentages of precoating water. (a) 0.9% water-to-aggregate. (b) 1.9% water-to-aggregate. (c) 2.9% water-to-aggregate.

Examination of the Coating Tests identified the best adhesion and coating of the emulsion, which occurred in the mix with 2.9% precoating water and 3% emulsion-to-aggregate, and was classified as good. This material's good dry behavior was easily observable, as it coincided in this case with the Theoretical Content of Fluids (TCF). It should be noted that the wrapping times were less than 60 s, and the breaking times of the emulsion were less than 300 s, reliable proof of compatibility of the emulsion with the aggregate.

Once Optimal Fluid Content (OFC) was determined, the different families of samples were manufactured with increasing percentages of emulsion. Circular 8/2001 [53] establishes a percentage of emulsion for cold in-place recycling of 2.5–4% to aggregate. To cover the entire possible range of combinations, therefore, three families were made, with increasing percentages of emulsion in increments of 0.5%, from 3% to 4% emulsion-to-aggregate. The 2.5% emulsion family was eliminated based on the assumption that this percentage of emulsion would be insufficient due to the large quantity of fine particles present. The precoating water for each family was calculated as the difference between Optimal Fluid Content (OFC) and the corresponding emulsion percentage. The percentage additions of precoating water and emulsion for each family are displayed in Table 6.

Table 6. Group of specimens manufactured with different percentages of emulsion and precoating water-to-aggregate.

Group	1	2	3
Precoating water-to-aggregate, %	2.9	2.4	1.9
Emulsion-to-aggregate, %	3	3.5	4

In total, 12 specimens were manufactured for each group following the standard NLT-161/98 [69]. After curing to a constant mass at a temperature of 50 ± 2 °C in a forced air stove, the specimens from each family were subdivided into two groups, which were subjected to different conditions. One group was immersed in water and the other kept dry, to assess the effect of water on the cohesion of the bituminous mixture. Table 7 shows the average values of particle density, bulk density, void content, dry compressive strength, post-immersion compressive strength, and preserved resistance.

Table 7. Test of maximum density, bulk density, void content, dry compressive strength, post-immersion compressive strength, and preserved resistance for the different groups of specimens.

Test	Standard	1	2	3
Maximum density, t/m ³	UNE-EN 12697-5 [81]	2.34 ± 0.04	2.31 ± 0.03	2.31 ± 0.08
Apparent density, t/m ³	UNE-EN 12697-6 [82]	2.14 ± 0.08	2.15 ± 0.07	2.14 ± 0.04
Void content, %	UNE-EN 12697-8 [83]	8.37 ± 0.31	6.81 ± 0.15	7.04 ± 0.25
Dry compressive strength, MPa	NLT-162/00 [70]	3.22 ± 0.12	3.51 ± 0.12	2.81 ± 0.09
Immersion compressive strength, MPa	NLT-162/00 [70]	2.90 ± 0.04	2.63 ± 0.03	1.99 ± 0.03
Preserved Resistance Index, %	NLT-162/00 [70]	90 ± 2	75 ± 2	71 ± 1

Based on the minimum values set forth in the Spanish regulations (3 MPa for dry resistance and 2.5 MPa for post-immersion compressive resistance), the values of 3% emulsion and 2.9% precoating water were acceptable in principle, as were 3.5% emulsion and 2.4% of precoating water-to-aggregate. The values obtained showed a clear decrease in the index of voids in the mixture with a higher percentage of emulsion, due to the compactability conditions provided by the emulsion. Based on dry compressive strength, the results identified an optimum point of 3–3.5% of emulsion-to-aggregate, as well as a decrease in post-immersion resistance with higher percentages of emulsion. The mathematically calculated optimal job mix formula provided maximum strength based on the results analyzed, showing the optimum combination of reclaimed asphalt pavement, ladle furnace slag, bitumen emulsion and water.

3.3. Optimal Job Mix Formula

Once the different specimen families were evaluated, the percentage of emulsion to obtain maximum resistance was studied mathematically. This percentage depended on the dry resistance and the points obtained from the different families. The maximum of this function, illustrated in Figure 6, coincided with 3.3% emulsion-to-aggregate and 2.6% precoating water.

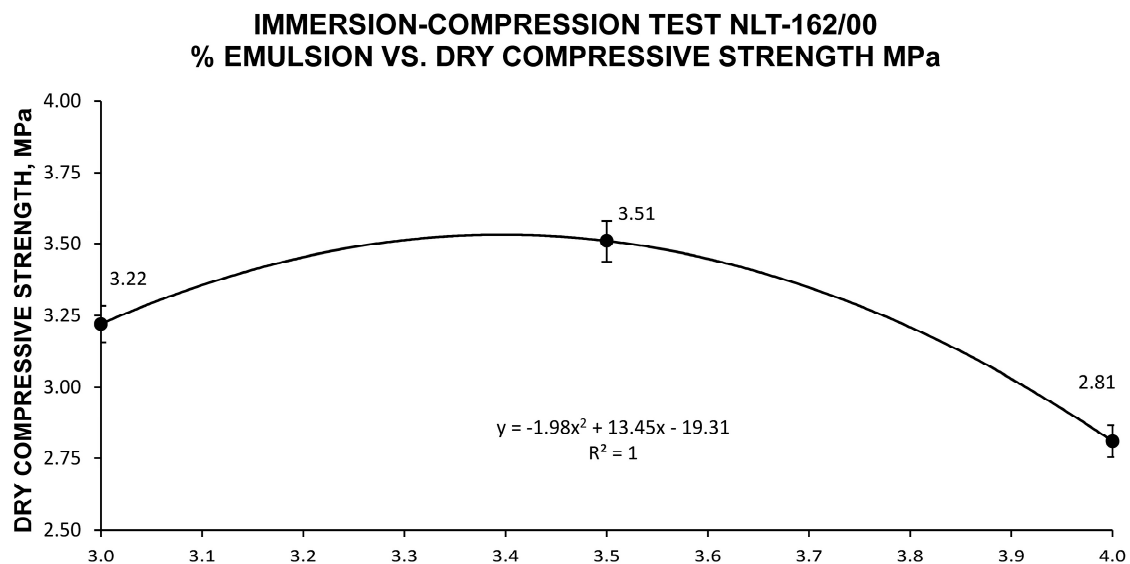


Figure 6. Test of dry compressive strength, NLT-162/00 [70], for the different emulsion percentages of each family of specimens.

Using the maximum obtained mathematically, and the percentages of the different materials to be added, 12 specimens were manufactured to confirm the optimal properties obtained with this job mix formula.

The process of manufacturing, curing, and studying the effect of water was similar to that performed on the other families. Table 8 presents the results of the trial for this optimal job mix formula.

Table 8. Tests for family of specimens made with the optimal job mix formula: 3.3% emulsion and 2.6% precoating water-to-aggregate.

Optimal job mix formula		
Test	Standard	Value/Unit
Precoating water, % of aggregate	-	2.6
Emulsion, % of aggregate	-	3.3
Maximum density, t/m ³	UNE-EN 12697-5 [81]	2.32 ± 0.07
Bulk density, t/m ³	UNE-EN 12697-6 [82]	2.15 ± 0.04
Void content, %	UNE-EN 12697-8 [83]	7.30 ± 0.27
Dry compressive strength, MPa	NLT-162/00 [70]	3.65 ± 0.06
Immersion compressive strength, MPa	NLT-162/00 [70]	2.91 ± 0.08
Preserved Resistance Index, %	NLT-162/00 [70]	80 ± 2

The combination of 90% reclaimed asphalt pavement to 10% ladle furnace slag, plus 2.6% precoating water and 3.3% emulsion, produced results superior to those of the other families. The values for dry compressive strength, post-immersion compressive strength, and preserved resistance were higher than those required by the relevant regulations. The minimum values established by Circular 8/2001 [53] are 3 MPa for dry compressive strength and 2.5 MPa for post-immersion compressive strength, with a Preserved Resistance Index maintained as greater than 75%.

The following should be highlighted: a high percentage of RAP was utilized. This percentage of 90% RAP would have been unacceptable in other techniques that do not use bitumen emulsion and just use bitumen (e.g., hot mixes asphalt). This percentage of RAP was adequate, as reflected in the compressive strength tests. These results were obtained thanks to its cementitious properties and by the addition of ladle furnace slag. Finally, it should be pointed out that the same milling equipment was used for the laboratory tests as would later be used in the execution of the bituminous mix, since otherwise the particle size distribution could vary.

4. Conclusions

The following summarizes the partial conclusions that can be drawn from the results of the tests described in the methodology:

- Elementary composition of the ladle furnace slag studied showed a majority percentage of calcium oxide and a lower percentage of silicon oxide. Both compounds are essential for developing the desired cementitious characteristics of the ladle furnace slag and providing the strength of the asphalt mix manufactured with them.
- The ladle furnace slag had a maximum aggregate size of less than 12.5 mm, with primarily fine grading. Its particle and bulk density were comparable to those of a conventional aggregate and did not show plasticity.
- The slow-breaking cationic bitumen emulsion C60B5 REC showed good compatibility with the combination of ladle furnace slag and reclaimed asphalt pavement, as shown by the coating test. Both the adhesion of the emulsion to the aggregate and its cohesion and breaking times are suitable for use with ladle furnace slag and reclaimed asphalt pavement, with maximum precoating amounts of water-to-aggregate of 2.9% and emulsion-to-aggregate of 3%.
- The tests of both simple dry and post-immersion compressive strength showed good results (superior to Spanish regulations) for 3–3.5% emulsion-to-aggregate, corresponding to 2.9–2.4% precoating water-to-aggregate, respectively.
- The optimal combination of the different materials—considering an aggregate mixture of 90% reclaimed asphalt pavement and 10% ladle furnace slag, emulsion percentages of 3.3% to aggregate, and 2.6% precoating water—showed values of simple dry compressive strength and post-immersion compressive strength higher than those established by Spanish regulations and those of the other families tested.

Based on these detailed partial conclusions, ladle furnace slag has good characteristics for manufacturing pavement through cold in-place recycling with bitumen emulsion. The addition of ladle furnace slag achieved, on the one hand, the appropriate adjustment of the particle size of the reclaimed asphalt pavement, and on the other hand, provided resistance characteristics observable in the results obtained. It was therefore an ideal solution that created a sustainable asphalt mix: by considerably reducing CO₂ emissions; that used by-products in its composition therefore avoiding their disposal in landfills; and that was in-keeping with new environmental and circular economy trends.

Author Contributions: Conceptualization, F.A.C.-I., F.J.I.-G., J.M.T.-S. and C.M.-G.; methodology, F.A.C.-I., F.J.I.-G., J.M.T.-S. and C.M.-G.; software, J.M.T.-S. and C.M.-G.; validation, F.A.C.-I. and F.J.I.-G.; formal analysis, F.A.C.-I. and F.J.I.-G.; investigation, J.M.T.-S. and C.M.-G.; resources, F.A.C.-I.; data curation, F.J.I.-G.; writing—original draft preparation, C.M.-G.; writing—review and editing, J.M.T.-S.; visualization, J.M.T.-S.; supervision, F.A.C.-I.; project administration, C.M.-G.; funding acquisition, F.A.C.-I. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Acknowledgments: Technical and human support provided by CICT of Universidad de Jaén (UJA, MINECO, Junta de Andalucía, FEDER) is gratefully acknowledged.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Plati, C. Sustainability factors in pavement materials, design, and preservation strategies: A literature review. *Constr. Build. Mater.* **2019**, *211*, 539–555. [[CrossRef](#)]
2. Shi, X.; Mukhopadhyay, A.; Zollinger, D.; Grasley, Z. Economic input-output life cycle assessment of concrete pavement containing recycled concrete aggregate. *J. Clean. Prod.* **2019**, *225*, 414–425. [[CrossRef](#)]
3. Arabani, M.; Azarhoosh, A.R. The effect of recycled concrete aggregate and steel slag on the dynamic properties of asphalt mixtures. *Constr. Build. Mater.* **2012**, *35*, 1–7. [[CrossRef](#)]
4. Jin, R.; Li, B.; Zhou, T.; Wanatowski, D.; Piroozfar, P. An empirical study of perceptions towards construction and demolition waste recycling and reuse in China. *Resour. Conserv. Recycl.* **2017**, *126*, 86–98. [[CrossRef](#)]
5. Menaria, Y.; Sankhla, R. Use of Waste Plastic in Flexible Pavements–Green Roads. *Open J. Civ. Eng.* **2015**, *05*, 299–311. [[CrossRef](#)]
6. Simone, A.; Vignali, V.; Lantieri, C. A new “frugal” approach to road maintenance: 100% Recycling of a deteriorated flexible pavement. In Proceedings of the 7th International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control, MAIREPAV 2012, Auckland, New Zealand, 28–30 August 2012.
7. Turk, J.; Mauko Pranjić, A.; Mladenović, A.; Cotič, Z.; Jurjavčič, P. Environmental comparison of two alternative road pavement rehabilitation techniques: Cold-in-place-recycling versus traditional reconstruction. *J. Clean. Prod.* **2016**, *121*, 45–55. [[CrossRef](#)]
8. Zhang, W.; Yang, J.; Fan, X.; Yang, R.; Yu, B. Life-Cycle Cost Analysis of Base Course Using Cold In-Place Recycling: Case Study. In Proceedings of the Geo-Frontiers 2011, Dallas, TX, USA, 13–16 March 2011.
9. Liu, M.H. Research and Application Prospect on Cold Recycling Technology of Asphalt Pavement. *Appl. Mech. Mater.* **2012**, *204–208*, 1909–1913. [[CrossRef](#)]
10. Alkins, A.E.; Lane, B.; Kazmierowski, T. Sustainable Pavements: Environmental, Economic, and Social Benefits of In Situ Pavement Recycling. *Transp. Res. Rec.* **2008**, *2084*, 100–103. [[CrossRef](#)]
11. Martinez-Echevarría, M.J.; Rubio, M.C.; Menendez, A. The reuse of waste from road resurfacing: Cold in-place recycling of bituminous pavement, an environmentally friendly alternative to conventional pavement rehabilitation methods. *WIT Trans. Ecol. Environ.* **2008**, *109*, 459–469.
12. Thenoux, G.; González, Á.; Dowling, R. Energy consumption comparison for different asphalt pavements rehabilitation techniques used in Chile. *Resour. Conserv. Recycl.* **2007**, *49*, 325–339. [[CrossRef](#)]
13. Modarres, A.; Rahimzadeh, M.; Zarrabi, M. Field investigation of pavement rehabilitation utilizing cold in-place recycling. *Resour. Conserv. Recycl.* **2014**, *83*, 112–120. [[CrossRef](#)]
14. Cross, S.A.; Chesner, W.H.; Justus, H.G.; Kearney, E.R. Life-Cycle Environmental Analysis for Evaluation of Pavement Rehabilitation Options. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* **2011**, *2227*, 43–52. [[CrossRef](#)]
15. Euch Khay, S.E.; Euch Ben Said, S.E.; Loulizi, A.; Neji, J. Laboratory Investigation of Cement-Treated Reclaimed Asphalt Pavement Material. *J. Mater. Civ. Eng.* **2015**, *27*, 04014192. [[CrossRef](#)]
16. Lee, K.W.; Brayton, T.E.; Mueller, M.; Singh, A. Rational Mix-Design Procedure for Cold In-Place Recycling Asphalt Mixtures and Performance Prediction. *J. Mater. Civ. Eng.* **2016**, *28*, 04016008. [[CrossRef](#)]
17. Li, X.; Wen, H.; Edil, T.B.; Sun, R.; VanReken, T.M. Cost, energy, and greenhouse gas analysis of fly ash stabilised cold in-place recycled asphalt pavement. *Road Mater. Pavement Des.* **2013**, *14*, 537–550. [[CrossRef](#)]
18. Kim, Y.; Lee, H. “David” Development of Mix Design Procedure for Cold In-Place Recycling with Foamed Asphalt. *J. Mater. Civ. Eng.* **2006**, *18*, 116–124. [[CrossRef](#)]
19. Stimilli, A.; Ferrotti, G.; Graziani, A.; Canestrari, F. Performance evaluation of a cold-recycled mixture containing high percentage of reclaimed asphalt. *Road Mater. Pavement Des.* **2013**, *14*, 149–161. [[CrossRef](#)]
20. Diefenderfer, B.K.; Bowers, B.F.; Apeageyi, A.K. Initial Performance of Virginia’s Interstate 81 In-Place Pavement Recycling Project. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* **2015**, *2524*, 152–159. [[CrossRef](#)]
21. Maurer, G.; Bemanian, S.; Polish, P. Alternative Strategies for Rehabilitation of Low-Volume Roads in Nevada. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* **2007**, *1989–2*, 309–320. [[CrossRef](#)]
22. Cox, B.C.; Howard, I.L.; Battey, R. In-Place Recycling Moisture-Density Relationships for High-Traffic Applications. In Proceedings of the IFCEE 2015, San Antonio, TX, USA, 17–21 March 2015.
23. Diefenderfer, B.K.; Apeageyi, A.K.; Gallo, A.A.; Dougald, L.E.; Weaver, C.B. In-Place Pavement Recycling on I-81 in Virginia. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* **2012**, *2306*, 21–27. [[CrossRef](#)]

24. Cox, B.C.; Howard, I.L.; Campbell, C.S. Cold In-Place Recycling Moisture-Related Design and Construction Considerations for Single or Multiple Component Binder Systems. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* **2016**, *2575*, 27–38. [CrossRef]
25. Recasens, R.M.; Pérez Jiménez, F.E.; Aguilar, S.C. Mixed recycling with emulsion and cement of asphalt pavements. Design procedure and improvements achieved. *Mater. Struct.* **2000**, *33*, 324–330. [CrossRef]
26. Wen, H.; Tharaniyil, M.P.; Ramme, B. Investigation of Performance of Asphalt Pavement with Fly-Ash Stabilized Cold In-Place Recycled Base Course. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* **2003**, *1819*, 27–31. [CrossRef]
27. Escorias de Acería de Horno de Arco Eléctrico | CEDEX. Available online: <http://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/25/escorias-de-aceria-de-horno-de-arco-electrico/> (accessed on 29 April 2020).
28. Motz, H.; Geiseler, J. Products of steel slags an opportunity to save natural resources. *Waste Manag. Ser.* **2000**, *1*, 207–220.
29. Pioro, L.; Pioro, I. Reprocessing of metallurgical slag into materials for the building industry. *Waste Manag.* **2004**, *24*, 371–379. [CrossRef]
30. Dippenaar, R. Industrial uses of slag (the use and re-use of iron and steelmaking slags). *Ironmak. Steelmak.* **2005**, *32*, 35–46. [CrossRef]
31. Tsakiridis, P.E.; Papadimitriou, G.D.; Tsivilis, S.; Koroneos, C. Utilization of steel slag for Portland cement clinker production. *J. Hazard. Mater.* **2008**, *152*, 805–811. [CrossRef]
32. Adolfsson, D.; Engström, F.; Robinson, R.; Björkman, B. Cementitious Phases in Ladle Slag. *Steel Res. Int.* **2011**, *82*, 398–403. [CrossRef]
33. Shi, C. Characteristics and cementitious properties of ladle slag fines from steel production. *Cem. Concr. Res.* **2002**, *32*, 459–462. [CrossRef]
34. Ortega-López, V.; Manso, J.M.; Cuesta, I.I.; González, J.J. The long-term accelerated expansion of various ladle-furnace basic slags and their soil-stabilization applications. *Constr. Build. Mater.* **2014**, *68*, 455–464. [CrossRef]
35. Manso, J.M.; Ortega-López, V.; Polanco, J.A.; Setién, J. The use of ladle furnace slag in soil stabilization. *Constr. Build. Mater.* **2013**, *40*, 126–134. [CrossRef]
36. Richardson, I.G.; Cabrera, J.G. The nature of C–S–H in model slag-cements. *Cem. Concr. Compos.* **2000**, *22*, 259–266. [CrossRef]
37. Akın Altun, İ.; Yılmaz, İ. Study on steel furnace slags with high MgO as additive in Portland cement. *Cem. Concr. Res.* **2002**, *32*, 1247–1249. [CrossRef]
38. Manso, J.M.; Rodríguez, Á.; Aragón, Á.; Gonzalez, J.J. The durability of masonry mortars made with ladle furnace slag. *Constr. Build. Mater.* **2011**, *25*, 3508–3519. [CrossRef]
39. Faraone, N.; Tonello, G.; Furlani, E.; Maschio, S. Steelmaking slag as aggregate for mortars: Effects of particle dimension on compression strength. *Chemosphere* **2009**, *77*, 1152–1156. [CrossRef]
40. Papayianni, I.; Anastasiou, E. Effect of granulometry on cementitious properties of ladle furnace slag. *Cem. Concr. Compos.* **2012**, *34*, 400–407. [CrossRef]
41. Rodríguez, Á.; Manso, J.M.; Aragón, Á.; Gonzalez, J.J. Strength and workability of masonry mortars manufactured with ladle furnace slag. *Resour. Conserv. Recycl.* **2009**, *53*, 645–651. [CrossRef]
42. Papayianni, I.; Anastasiou, E. Production of high-strength concrete using high volume of industrial by-products. *Constr. Build. Mater.* **2010**, *24*, 1412–1417. [CrossRef]
43. Montenegro, J.M.; Celemín-Matachana, M.; Cañizal, J.; Setién, J. Ladle Furnace Slag in the Construction of Embankments: Expansive Behavior. *J. Mater. Civ. Eng.* **2013**, *25*, 972–979. [CrossRef]
44. Sun, D.D.; Tay, J.H.; Cheong, H.K.; Leung, D.L.K.; Qian, G. Recovery of heavy metals and stabilization of spent hydrotreating catalyst using a glass–ceramic matrix. *J. Hazard. Mater.* **2001**, *87*, 213–223. [CrossRef]
45. Radenović, A.; Malina, J.; Sofilić, T. Characterization of Ladle Furnace Slag from Carbon Steel Production as a Potential Adsorbent. *Adv. Mater. Sci. Eng.* **2013**, *2013*, 198240. [CrossRef]
46. Montenegro-Cooper, J.M.; Celemín-Matachana, M.; Cañizal, J.; González, J.J. Study of the expansive behavior of ladle furnace slag and its mixture with low quality natural soils. *Constr. Build. Mater.* **2019**, *203*, 201–209. [CrossRef]
47. Ortega-López, V.; Fuente-Alonso, J.A.; Santamaría, A.; San-José, J.T.; Aragón, Á. Durability studies on fiber-reinforced EAF slag concrete for pavements. *Constr. Build. Mater.* **2018**, *163*, 471–481. [CrossRef]

48. Pasetto, M.; Baldo, N. Recycling of waste aggregate in cement bound mixtures for road pavement bases and sub-bases. *Constr. Build. Mater.* **2016**, *108*, 112–118. [CrossRef]
49. Bocci, E. Use of ladle furnace slag as filler in hot asphalt mixtures. *Constr. Build. Mater.* **2018**, *161*, 156–164. [CrossRef]
50. Ziaee, S.A.; Behnia, K. Evaluating the effect of electric arc furnace steel slag on dynamic and static mechanical behavior of warm mix asphalt mixtures. *J. Clean. Prod.* **2020**, *274*, 123092. [CrossRef]
51. Skaf, M.; Ortega-López, V.; Fuente-Alonso, J.A.; Santamaría, A.; Manso, J.M. Ladle furnace slag in asphalt mixes. *Constr. Build. Mater.* **2016**, *122*, 488–495. [CrossRef]
52. Martínez-Echevarría, M.J.; Recasens, R.M.; del Carmen Rubio Gámez, M.; Ondina, A.M. In-laboratory compaction procedure for cold recycled mixes with bituminous emulsions. *Constr. Build. Mater.* **2012**, *36*, 918–924. [CrossRef]
53. Orden Circular 8/2001 Sobre RECICLADO DE FIRMES—Normativa de Carreteras. Available online: <http://normativadecarreteras.com/listing/orden-circular-82001-sobre-reciclado-de-firmes/> (accessed on 29 September 2020).
54. UNE-EN 1430:2009 Bitumen and Bituminous Binders—Determination of Particle Polarity of Bituminous Emulsions. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0044069> (accessed on 29 September 2020).
55. UNE-EN 13075-1:2017 Bitumen and Bituminous Binders—Determination of Breaking Behaviour—Part 1: Determination of Breaking Value of Cationic Bituminous Emulsions, Mineral Filler Method. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0057840> (accessed on 29 September 2020).
56. UNE-EN 12846-1:2011 Bitumen and Bituminous Binders—Determination of Efflux Time by the Efflux Viscometer—Part 1: Bituminous Emulsions. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0047377> (accessed on 29 September 2020).
57. UNE-EN 12846:2003 Bitumen and Bituminous Binders. Determination of Efflux Time of Bitumen Emulsions by the Efflux Viscometer. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0029984> (accessed on 29 September 2020).
58. UNE-EN 1429:2013 Bitumen and bituminous binders—Determination of residue on sieving of bituminous emulsions, and determination of storage stability by sieving. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0052189> (accessed on 29 September 2020).
59. UNE-EN 12847:2009 Bitumen and bituminous binders—Determination of settling tendency of bituminous emulsions. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0044066> (accessed on 29 September 2020).
60. UNE-EN 13614:2011 Bitumen and bituminous binders—Determination of adhesivity of bituminous emulsions by water immersion test. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0048094> (accessed on 29 September 2020).
61. UNE-EN 1431:2018 Bitumen and Bituminous Binders—Determination of Residual Binder and oil Distillate from Bitumen Emulsions by Distillation. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0060676> (accessed on 29 September 2020).
62. UNE-EN 1426:2015 Bitumen and Bituminous Binders—Determination of Needle Penetration. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0055820> (accessed on 29 September 2020).
63. UNE-EN 1427:2015 Bitumen and Bituminous Binders—Determination of the Softening Point—Ring and Ball Method. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0055821> (accessed on 29 September 2020).
64. UNE-EN 13074-1:2019 Bitumen and Bituminous Binders—Recovery of Binder from Bituminous Emulsion or Cut-Back or Fluxed Bituminous Binders—Part 1: Recovery by Evaporation. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0062153> (accessed on 29 September 2020).
65. UNE-EN 13074-2:2011 Bitumen and Bituminous Binders—Recovery of Binder from Bituminous Emulsion or Cut-Back or Fluxed Bituminous Binders—Part 2: Stabilisation after Recovery by Evaporation. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0047380> (accessed on 29 September 2020).

66. NLT-389/00 Fabricación y Curado de Mezclas de Materiales Áridos, reciclados o sin reciclar con emulsión bituminosa para ensayos de compresión y efecto del agua sobre su cohesión—Normativa de carreteras. Available online: <http://normativadecarreteras.com/listing/nlt-38900-fabricacion-curado-mezclas-materiales-aridos-reciclados-sin-reciclar-emulsion-bituminosa-ensayos-compresion-efecto-del-agua-cohesion/> (accessed on 29 September 2020).
67. UNE 103501:1994 Geotechnic. Compaction Test. *Modified Proctor*. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0007851> (accessed on 29 September 2020).
68. NLT-196/84 Envuelta y resistencia al desplazamiento por el agua de las emulsiones bituminosas—Normativa de carreteras. Available online: <http://normativadecarreteras.com/listing/nlt-19684-envuelta-resistencia-al-desplazamiento-agua-las-emulsiones-bituminosas/> (accessed on 29 September 2020).
69. NLT-161/98 Resistencia a compresión simple de mezclas bituminosas.—Normativa de carreteras. Available online: <http://normativadecarreteras.com/listing/nlt-16100-resistencia-compresion-simple-mezclas-bituminosas/> (accessed on 29 September 2020).
70. NLT-162/00 Efecto del agua sobre la cohesión de las mezclas bituminosas compactadas. (ensayo de inmersión-compresión)—Normativa de carreteras. Available online: <http://normativadecarreteras.com/listing/nlt-16200-efecto-del-agua-la-cohesion-las-mezclas-bituminosas-compactadas-ensayo-inmersion-compresion/> (accessed on 29 September 2020).
71. UNE-EN 933-1:2012 Tests for geometrical properties of aggregates—Part 1: Determination of particle size distribution—Sieving method. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0049638> (accessed on 29 September 2020).
72. UNE-EN 12697-1:2013 Bituminous mixtures—Test methods for hot mix asphalt—Part 1: Soluble binder content. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0050801> (accessed on 29 September 2020).
73. UNE-EN 1097-2:2010 Tests for Mechanical and Physical Properties of Aggregates—Part 2: Methods for the Determination of Resistance to Fragmentation. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0046026> (accessed on 16 September 2020).
74. UNE-EN 933-5:1999/A1:2005 Tests for geometrical properties of aggregates—Part 5: Determination of percentage of crushed and broken surfaces in coarse aggregate particles. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0034842> (accessed on 16 September 2020).
75. UNE-EN 933-3:2012 Tests for Geometrical Properties of Aggregates—Part 3: Determination of Particle Shape—Flakiness Index. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0049063> (accessed on 16 September 2020).
76. UNE-EN 933-8:2012+A1:2015/1M: 2016 Tests for geometrical properties of aggregates—Part 8: Assessment of fines—Sand equivalent test. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0056257> (accessed on 16 September 2020).
77. UNE 103103:1994 Determinación del Limite Liquido de un Suelo p. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0007830> (accessed on 29 September 2020).
78. UNE 103104:1993 Test for Plastic Limit of a Soil. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0007831> (accessed on 29 September 2020).
79. UNE-EN 1097-7:2009 Tests for Mechanical and Physical Properties of Aggregates—Part 3: Determination of Loose Bulk Density and Voids. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0042553> (accessed on 16 September 2020).
80. UNE-EN 1097-3:1999 Tests for Mechanical and Physical Properties of Aggregates—Part 3: Determination of Loose Bulk Density and Voids. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0009465> (accessed on 16 September 2020).
81. UNE-EN 12697-5:2020 Test Methods—Part 5: Determination of the Maximum Density. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0063145> (accessed on 29 September 2020).

82. UNE-EN 12697-6:2012 Bituminous Mixtures—Test Methods for Hot Mix Asphalt—Part 6: Determination of Bulk Density of Bituminous Specimens. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0049868> (accessed on 29 September 2020).
83. UNE-EN 12697-8:2020 Bituminous Mixtures—Test methods—Part 8: Determination of Void Characteristics of Bituminous Specimens. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0063146> (accessed on 29 September 2020).





Publisher’s Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



© 2020 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Article

Development of Porous Asphalt with Bitumen Emulsion, Electric arc Furnace Slag and Cellulose Fibers for Medium Traffic Roads

Juan María Terrones-Saeta ^{*}, Jorge Suárez-Macías , Francisco Javier Iglesias-Godino  and Francisco Antonio Corpas-Iglesias 

Department of Chemical, Environmental and Materials Engineering, Higher Polytechnic School of Linares, University of Jaen, Scientific and Technological Campus of Linares, Linares, 23700 Jaen, Spain.;

jsuarez@ujaen.es (J.S.-M.); figodino@ujaen.es (F.J.I.-G.); facorpas@ujaen.es (F.A.C.-I.)

* Correspondence: terrones@ujaen.es; Tel.: +34-675-201-939

Received: 20 August 2020; Accepted: 28 September 2020; Published: 1 October 2020



Abstract: The construction of road infrastructure is one of the most polluting activities that exists today. Therefore, the use of waste from other industries is an excellent solution, since it reduces the consumption of raw materials, reduces CO₂ emissions and avoids the disposal of waste in a landfill. In this study, electric arc furnace slag, cellulose fibers from the papermaking industry and bitumen emulsion were used for the conformation of sustainable and porous bituminous mixtures. Electric arc furnace slag was used as a high-resistance aggregate with a capacity sufficient to support traffic loads. Cellulose fibers were added to increase the percentage of binder in the mixture without bleeding problems, thereby achieving greater tensile strength. To do this, first the waste was physically and chemically characterized, then different mixtures were conformed and finally the mixtures were studied by means of the loss by wear and Marshall tests. The results reflected an optimal combination of materials that provided the best results in the mechanical tests, obtaining much better results than the mixtures with discontinuous grading and traditional bitumen emulsion. Therefore, a sustainable, porous and economical mixture for road use is obtained in this research.

Keywords: Bituminous mixtures; discontinuous grading; electric arc furnace slags; cellulose fibers; bitumen emulsion; waste; skid resistance; porous asphalt; Marshall tests; sustainability

1. Introduction

Recent developments in society, including greater environmental sensitivity and, consequently, more restrictive environmental regulations, have created ideal circumstances for the formulation of new materials that are more sustainable for the environment [1,2]. These materials represent a new working paradigm, with the sole purpose of providing materials with similar or superior characteristics to the traditional ones but with an optimization in their manufacturing process and in the use of raw materials [3]. Therefore, they significantly reduce the carbon footprint in their life cycle assessment [4].

In line with the above, and based mainly on the reduction of the use of raw materials for the creation of the different products, the so-called Circular Economy arises [5]. This type of production differs from the previous linear economy in several ways, essentially in the reduction of the Environmental Impact [6,7]. The old linear economy was based on the extraction of the different raw materials for the conformation of the material, its later manufacture with little optimized industrial processes, the use of the product and, at the end of its useful life, the withdrawal of the product in landfill [8,9]. It is clear that in each and every one of the mentioned phases there is an important environmental impact, creating at the same time a great exploitation of the resources and a remarkable generation of waste [10].

As a solution to this problem, the Circular Economy has arisen, the basis of which is the use of different unusable products to make new materials [11,12]. Moreover, this form of production is not only a reduction of the extraction of the initial materials, but also takes into account more optimized industrial processes, responsible use of the product in its useful life and withdrawal for new production. In other words, the entire life cycle assessment of the product [13].

This more environmentally friendly methodology is the basis of this applied research in the construction sector, more specifically in linear infrastructure [14]. The road construction sector is one of the most harmful to the environment, as the interaction with the environment in most cases is quite intense. However, the construction of road infrastructure is essential for the economic development of a region, as well as for improvement of the quality of life of the population [15,16]. It should be noted that most land transport is carried out by road, moving huge volumes of products and facilitating the market [17]. In turn, the good condition of pavement has been demonstrated in various publications as having a significant influence on fuel consumption, and consequently, on CO₂ emissions, and even more so, on accidents [18–20]. Therefore, far from trying to avoid the construction of new roads or maintenance, quality infrastructure must be provided, which affords a comfortable and safe wearing course, and at the same time, is as sustainable as possible [21,22].

The present study is based on the aforementioned, however, its field of action is restricted to medium and low traffic roads [23]. The study of this type of infrastructure is motivated by two factors; on the one hand, this type of infrastructure receives the least investment in their construction and maintenance, so the quality of the pavement is not always assured during its useful life. On the other hand, medium and low traffic roads represent a significant percentage of all roads, and are the most likely to produce accidents and mortality.

On this basis, the foundation is the creation of quality pavements, economical and with techniques as sustainable as possible. It is therefore the discontinuous grading bituminous mixtures with bitumen emulsion that is the most adequate solution to this problem [24].

Discontinuous grading bituminous mixtures with bitumen emulsion are bituminous mixtures with low CO₂ emissions, as a result of using bitumen emulsions that allow them to be manufactured and applied at ambient temperature [25,26]. At the same time, they provide a comfortable and safe road surface for vehicles and possess several particular characteristics [27]. Among these characteristics are: the capacity to drain water, due to its high content of voids; high skid resistance, provided by its macrotexture derived from the use of mainly coarse aggregate; the reduction of noise emissions, as it has a high content of voids that is capable of absorbing noise [28,29]; as well as a comfortable bituminous mixture in terms of regularity, safety and sonority for drivers [30–32]. They are, therefore, bituminous mixtures with very good characteristics that have, however, not always been developed successfully, because of the use of low-quality materials or inadequate execution processes [33].

All of the aforementioned characteristics derive from its grading, which is mainly composed of coarse aggregate and, to a lesser extent, of fine aggregate. On the one hand, coarse aggregate works by friction resisting the important loads of traffic, and on the other hand, fine aggregate in conjugation with the bitumen of the emulsion provides the adequate characteristics to resist the tractions created by traffic. They are therefore both essential elements for the production of a bituminous mixture suitable for traffic, and for durability. In both elements, important improvements have been made in this research to obtain a product of maximum quality, differentiable from the conventional one [34].

As mentioned, the tensile strength of the bituminous mixture is supported by the mixture of the bitumen of the emulsion and fine aggregate. To improve this property, cellulose fibers discarded by the papermaking industry were incorporated. These cellulose fibers have the main function of being able to retain higher percentages of bitumen without the production of exudations. In this way, this higher percentage of bitumen makes possible the higher tensile strength of the bituminous mixture, and consequently, a substantial increase in its durability [35]. An example of this use are the bituminous mixtures called Stone Mastic Asphalt, which are hot mixes with commercial fibers. This type of bituminous mixture achieves higher percentages of bitumen and, consequently, a long

life [36,37]. In this case, and based on the principles of the circular economy mentioned, discarded fibers were used, avoiding the use of new raw materials, which, in turn, are highly expensive.

It has also been shown that the use of a quality aggregate capable of withstanding the compressive stresses of traffic is essential for achieving a resistant bituminous mixture. The extraction of virgin materials to obtain quality aggregates entails higher CO₂ emissions as well as a higher economic cost. To solve this problem and substantially improve the bituminous mixture, electric arc furnace slags from the steelmaking industry were used [38]. These electric arc furnace slags are discarded in the conforming process of new metallic materials through the initial scrap, and are therefore a high production byproduct with unbeatable resistance and textural characteristics.

In short, this study develops a new bituminous mixture composed of electric arc furnace slags as a coarse and fine aggregate, and cellulose fibers discarded by the papermaking industry, as an additive. The result is a porous asphalt [39] that is sustainable, with low CO₂ emissions, storable, easy to apply, highly skid resistance and comfortable for the driver.

Current research has evaluated the suitability of electric arc furnace slag as an aggregate for bituminous mixtures with bitumen [40] or bitumen emulsion [41]. All these investigations agree on the quality of slag as an aggregate for bituminous mixtures and the acceptable results it provides. In turn, cellulose fibers have been used in bituminous mixtures with bitumen emulsion [42] and with bitumen [36], reflecting the increase in the percentage of binder that can be obtained and the increase in service life. Bituminous mixtures have even been developed with electric arc furnace slag, bitumen and cellulose fibers [43], obtaining good mechanical resistance from the mixtures developed. However, the combination of materials presented in this research of electric arc furnace slag, cellulose fibers rejected by the paper industry and bitumen emulsion, represents the development of a new sustainable and economical bituminous mix. This is because it uses waste from the industry in very high percentages and uses construction techniques with lower CO₂ emissions.

There are different regulations depending on the country that controls the quality of this type of bituminous mixture with discontinuous grading and bitumen emulsion. However, given the importance and development that this type of technique obtained in Spain, with several success stories, the Spanish regulations were used to assess the suitability of the bituminous mixture.

Therefore, the initial materials conforming the bituminous mixture (electric arc furnace slags and cellulose fibers) were analyzed [44–46]. After physical and chemical analysis of the materials, we proceeded to conform different bituminous mixtures that were formed with electric arc furnace slags, cellulose fibers and increasing percentages of bitumen emulsion, up to the maximum percentage that produced bitumen exudation in the curing process. The conformed samples after the curing process were tested to determine their physical properties, bulk density, maximum density and void content. The subsequent particle loss test without immersion and after immersion in water reflected the wear resistance of the bituminous mixture, as well as the cohesion of the aggregate and the emulsion. Given the high percentage of bitumen created by the incorporation of the fibers, the plastic deformations of the different groups of samples were evaluated with the Marshall test.

The results of the aforementioned tests have been able to establish an optimum combination of materials based on the grading curve made up of electric arc furnace slags, 0.5% cellulose fibers, and 10.8% emulsion. This optimal combination, after the manufacture of the bituminous mixture and its curing, provides a percentage of residual bitumen of 6.5%, and in turn, reflects optimal values of the Marshall test as well as the particle loss test. A bituminous mixture with a void content of more than 20% has therefore been created, which is comfortable, safe and has draining characteristics, using industrial byproducts and manufacturing techniques with low CO₂ emissions.

2. Materials and Methods

This section of the present study details the materials used in the conformation of the bituminous mixtures, as well as the research methodology followed to achieve the mentioned objectives.

2.1. Materials

The materials used in this study have been selected in order to provide to the final bituminous mixture with the best physical and mechanical characteristics. Based on this, we proceed to define these materials in a general way, indicating the type of material, its function, as well as its origin.

The reproducibility of the results is essential, not only in a scientific manner, but also because of the alterations that could occur in the byproduct due to variations in the manufacturing process of primary companies. In other words, for a byproduct to be usable with viability and quality, it is necessary for it to be stable over time, which can be derived from the equality of results obtained in the different tests throughout different productions. Therefore, the chemical, physical and mechanical characteristics are maintained in different sets.

A clear example of the nonreproducibility of a byproduct is water treatment plant sludge. In this byproduct, its composition varies greatly depending on the region, location, treatment plant and even the temporary station where it is obtained. Therefore, it will be difficult to establish characteristics for its use in a final product.

Unlike the previous case, both the electric arc furnace slags and the cellulose fibers are stable over time, varying only slightly in their composition and physics or mechanical characteristics.

For the study of the materials and their forming into bituminous mixtures, the electric arc furnace slag and cellulose fibers were dried at a temperature of 105 ± 2 °C so that they did not contain water that could affect the results. The existence of humidity or water in the industry does not affect the final mixture, but that percentage must be taken into account for adding the different elements in the right proportion.

2.1.1. Electric Arc Furnace Slags

The electric arc furnaces slags of the steelmaking industry, hereinafter EAFS, has been supplied by companies in the area of Andalusia, Spain. These EAFS, obtained from the fusion phase, have a maximum particle size of less than 20 mm and constitute the granular material (coarse aggregate, fine aggregate and mineral filler). The mission of the EAFS is twofold: on the one hand, they provide the mineral skeleton for the bituminous mixture; and on the other hand, together with the bitumen, they support the traction loads of traffic. The tests carried out on EAFS are detailed in the methodology for evaluating their suitability.

The EAFS received from the industry all have particle sizes below 20 mm. Therefore, they were sieved in the sieves necessary for the grading envelope, according to regulations, and washed afterwards to ensure the fine aggregate content.

2.1.2. Cellulose Fibers from the Papermaking Industry

The cellulose fibers are a currently unused waste product from companies located in the province of Jaen, Spain. These fibers are discarded in the industrial process of manufacturing cardboard.

In the process of manufacturing packaging paper from recycled paper, the recycled paper is shredded in combination with water, in order to place the fibers in suspension. The mixture of fibers and water is subjected to a process of physical depuration, as it passes through different sieves. It is also subjected to a process of cyclonic separation of light and heavy elements. The rejects from these depurations are sent to a press to reduce the water content. This resulting waste is used in this study and is called cellulose fibers, hereinafter CFP.

These CFP have been used, after treatment, as an additive to the bituminous mixture created. They are the element suitable for the retention of the highest percentage of bitumen and consequently provide the greatest resistance and durability to the bituminous mixture. The analysis through different tests of the CFP, as well as the treatment for their use is described in the methodology.

2.1.3. Bitumen Emulsion

The bitumen emulsion used is the commercial C60BF3 MBA emulsion. This emulsion is suitable for bituminous mixtures with discontinuous grading, with its cationic nature and medium breaking time. The choice of this type of emulsion is motivated by two fundamental reasons; the grading of the final bituminous mixture makes it suitable for the coating of the aggregates in the stipulated breaking time; and the chemical nature of the emulsion is suitable for breaking in contact with the EAFS. Therefore, the use of emulsions of an anionic nature has been eliminated, due to incompatibility with the slags. This is also the case for emulsions with other breaking times, fast or slow, because they are not suitable for the grading curve of the bituminous mixture. In Table 1, the technical data sheet of the C60BF3 MBA emulsion is detailed.

Table 1. Technical details of the bitumen emulsion C60BF3 MBA used.

Characteristics	Unit	Standard	Min.	Max.
Original Emulsion				
Particle polarity	-	UNE EN 1430	Positive	-
Breaking value (Forshammer filler)	g	UNE EN 13075-1	70	155
Binder content (per water content)	%	UNE EN 12846-1	58	62
Oil distillate content	%	UNE EN 1431	-	5
Efflux time (2 mm, 40 °C)	s	UNE EN 12846	40	130
Residue on sieving (0.5 mm)	%	UNE EN 1429	-	0.10
Setting tendency (7 days storage)	%	UNE EN 12847	-	5
Water effect of binder adhesion	%	UNE EN 13614	90	-
Binder after distillation (UNE EN 1431)				
Penetration (25 °C; 100 g; 5 s)	0.1 mm	UNE EN 1426	-	220
Softening point	°C	UNE EN 1427	35	-
Evaporation residue (UNE EN 13074-1)				
Penetration (25 °C; 100 g; 5 s)	0.1 mm	UNE EN 1426	-	330
Softening point	°C	UNE EN 1427	35	-
Stabilizing residue (UNE EN 13074-2)				
Penetration (25 °C; 100 g; 5 s)	0.1 mm	UNE EN 1426	-	220
Softening point	°C	UNE EN 1427	35	-

2.2. Methodology

The methodology followed in this study is based on a series of sequential and ordered tests capable of detecting possible problems in the manufacturing of the final bituminous mixture. The aim of this study is to obtain a sustainable and economical bituminous mixture with particular characteristics, which is possible by the incorporation of byproducts and optimized industrial processes.

First, the materials were characterized chemically, physically and mechanically, to see if they are appropriate. Since they are not commercial and standardized materials, they may have particular characteristics that require special care in the different processes. In order to know these particularities, it is necessary to carry out tests to detect them.

Subsequently, and after determining the suitability of the industrial byproducts for use in bituminous mixtures, the grading curve of the EAFS was determined to form a mixture with discontinuous grading. The grading envelope of this type of asphalt mixture is defined in the Spanish regulations, General Technical Specifications for Roads of 1976 [47]. Once the grading curve was defined, Marshall type samples were conformed without the addition of CFP. The percentage of bitumen emulsion that produced bitumen exudation was selected as the starting point for the manufacture of mixtures with EAFS and CFP. In this way, the retention of bitumen by the CFP could be evaluated. Starting with this percentage of emulsion and with the defined grading curve of the

EAFS, different groups of samples were conformed with increasing percentages of emulsion. These sample groups were manufactured up to the percentage of emulsion that created inadequate emulsion breaking times or was rejected by its compaction. All of the sample groups conformed with emulsion and CFP were subjected to the usual physical tests for bituminous mixtures, as well as the particle loss tests without immersion and after immersion, detailed by the Spanish standards. The Marshall test was carried out to evaluate plastic deformations.

The results obtained from the different groups of samples were analyzed graphically and mathematically to determine the optimal combination of all materials that would provide the best mechanical characteristics. With this optimal combination, the samples were made to check that the best physical and mechanical properties had indeed been achieved. Obtaining this optimal combination of materials creates the final bituminous mixture, corroborating the efficiency of the use of EAFS and CFP in the manufacturing of bituminous mixtures of discontinuous grading with bitumen emulsion.

Figure 1 shows an outline of the different phases of the methodology of this research, as well as the main tests carried out.

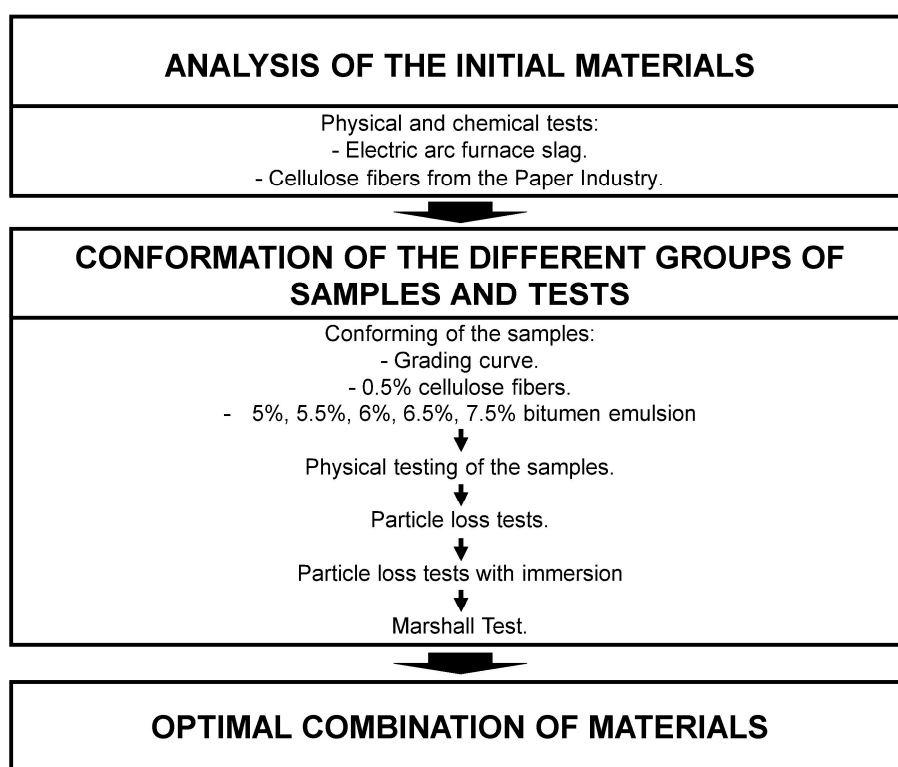


Figure 1. Diagram of the different phases of the methodology.

The following sections describe the detailed tests divided into three main blocks: analysis of the initial materials, conformation of the different groups of samples and tests, and optimal combination of materials.

2.2.1. Analysis of the Initial Materials

Initially, the CFP produced as waste in the papermaking industry were studied. These CFP, because of their function to homogenize in the bituminous mixture and absorb the binder, must be treated.

The CFP, as received from the factory, were washed to remove potential dirt and then treated with a solution of sodium hydroxide at 30%. There are two main reasons for carrying out the treatment with sodium hydroxide: the first is to paralyze any organic reaction that may occur; and the second is to remove any natural waxes present that may affect adherence to the bitumen. Once the CFP has been

subjected to this process, it is milled in order to obtain the smallest possible fibers, to cause an excellent homogenization in the mixing process in the bituminous mixture.

The CFP were then subjected to chemical tests: elemental analysis, to determine possible hazardous elements such as sulfur, and scanning electronic microscopy, to observe a large magnification of the shape and length of the final CFP obtained.

The EAFS of the steelmaking industry must be subjected to all existing tests for the corroboration of the quality of an aggregate in roads, but not without first determining the composition, through different chemical tests, for the study of compatibility between materials.

Based on this, the chemical analyses of elemental analysis and X-ray fluorescence were carried out. These tests show the existence of elements that may be hazardous to the bituminous mix and even to the environment. The chemical composition has a significant influence on the compatibility with the emulsion.

Once the chemical suitability of the slag had been assessed, the physical and mechanical characteristics were evaluated. For this purpose, the tests were divided into two groups depending on the size of the aggregate, coarse and fine aggregate, and mineral filler.

The tests carried out on the mineral filler were those of particle density UNE-EN 1097-7 and bulk density in kerosene UNE-EN 1097-3. At the same time, physical tests were carried out on coarse and fine aggregates: particle density UNE-EN 1097-7, sand equivalent test UNE-EN 933-8, percentage of crushed or rounded particles UNE-EN 933-5 and Flakiness index UNE-EN 933-3. The mechanical resistance of the EAFS was evaluated through the tests of resistance to fragmentation UNE-EN 1097-2 and resistance to freezing and thawing UNE-EN 1367-1. It should be noted that both the mineral filler and the coarse and fine aggregates were EAFS with obviously different sizes.

2.2.2. Conformation of the Different Groups of Samples and Tests

Once the chemical, physical and mechanical suitability of EAFS and CFP has been analyzed, the discontinuous grading bituminous mixture is formulated, hereinafter AF12. It should be noted that the Spanish legislation on this type of bituminous mixture was repealed, but because the scope of this study is mainly research, the legislation is still valid for the corroboration of the suitability of the bituminous mixture. Apart from the values of the General Technical Specifications for Roads 1976 [47], this study will use the good practice guide provided by the Technical Association of Bituminous Emulsions (hereinafter ATEB) [48], a guide written by experts in the field that sets out the necessary steps for evaluating the suitability of a bituminous mixture of this type.

The grading curve of the EAFS is the one established by the grading enveloped detailed in the aforementioned regulations. This grading curve, in order not to induce more variables, is the intermediate one between the upper and lower spindle; with the exception of the fine aggregate, which is slightly higher so as to form the perfect mixture with the percentages of bitumen and avoid exudations.

Once the grading curve is defined, the compatibility analysis of the aggregate with the emulsion is carried out. To do this, the adhesivity test is carried out according to the UNE-EN 13614 standard.

This test evaluates the quality of the aggregate coating by the emulsion, and consequently, the quality of the final mix to be developed.

First, AF12 bituminous mixtures with EAFS and without the addition of CFP were made. This was done to determine the starting point of the mixture with CFP as the one that produces exudation of the bitumen in the mixture that does not contain CFP. For this purpose, the percentage of emulsion to be added to the bituminous mixture was calculated according to the mathematical formula described by ATEB in its good Practice Guide. It should be noted that EAFS has a higher particle density than conventional aggregates, so in order to avoid problems with dosage, the appropriate volumetric corrections were made.

Once the point considered to be optimal was empirically calculate through the formula provided by ATEB, different groups of samples were made with bitumen, with increasing percentages of 0.5%.

In the conformation, it must be taken into account that the water in the emulsion will later be evaporated, so the reference values are the bitumen that, after evaporation, remain in the bituminous mixture.

The groups of samples carried out for the study of bitumen exudation consisted of three samples of each percentage of emulsion. Subsequently, all of the samples were subjected to a curing process to remove water from the emulsion. The Marshall type samples were flush with the mold and placed on sieves with an opening of less than 2 mm. The curing process consisted of two days at a temperature of 75 ± 2 °C and five more days at a temperature of 90 ± 2 °C (the curing processes are detailed in ATEB). During the curing process, the presence of bitumen exudation was continuously observed, through use of filter paper at the bottom of the sample during the process. The group of samples that caused the bitumen to exude was the starting point for dosing the emulsion into subsequent mixes with the addition of CFP.

Subsequently, the same type of bituminous mixture was made but with the addition of 0.5% of CFP in the aggregate, and with an initial bitumen percentage equal to that which caused binder runoff in the previous groups. The choice of the detailed grading curve is mentioned above, and the addition of 0.5% of CFP was motivated by two factors, one of them being the use in other similar works but in hot bituminous mixture (for example Stone Mastic Asphalt), and the other factor being the corroboration of this percentage as optimal in various studies and regulations on the subject [49].

The different groups of samples were conformed and cured according to the procedure described above, to finally carry out the appropriate physical and mechanical tests. The test carried out for the study of the quality of bituminous mixtures was the particle loss test, according to the UNE-EN 12697-17 standard. Next, and with all of the groups of samples, the study of plastic deformations was carried out with the Marshall test, UNE-EN 12697-34.

To complete the study, and to study the effect of the mentioned groups under adverse conditions, as well as the adequacy of the adhesiveness between the aggregate and the binder, a particle loss test after water immersion NLT-362/92 was performed. This procedure comprised the execution of the particle loss test UNE-EN 12697-17 with the immersion of the specimens before the test and after their curing in water at 45 ± 1 °C for 24 h.

It should be noted that all the test pieces had a total mass of EAFS equivalent to 1000 g of a conventional aggregate. As EAFS have a higher density, volumetric corrections had to be made. CFP were added after the EAFS and before the bitumen emulsion, with the mix stirring time equal to the emulsion breaking time. At the same time, all of the samples were compacted in the impact compactor with 50 impacts per side, UNE-EN 12697-30. After the curing process, the maximum density, bulk density and void content were obtained for all groups of samples, in accordance with standards UNE-EN 12697-5, UNE-EN 12697-6 and UNE-EN 12697-8, respectively.

2.2.3. Optimal Combination of Materials and Obtention of Final Characteristics

With the results of the mentioned tests for the different groups of samples, it was possible to observe, graphically and mathematically, the improvement produced in the groups with the addition of the CFP. In turn, the study of graphic and mathematical models provided an optimal percentage of bituminous emulsion that developed the best physical and mechanical characteristics. This combination is the one that was denominated as optimal and with which all the mentioned tests were carried out again for the corroboration of the mathematically determined properties. These tests to determine the physical properties of the final bituminous mixture were: maximum density UNE-EN 12697-5, bulk density UNE-EN 12697-6 and void content UNE-EN 12697-8; and for the mechanical properties: particles loss without immersion and after immersion UNE-EN 12697-17 and the Marshall test UNE-EN 12697-34.

3. Results and Discussion

This section describes the results obtained from the tests mentioned in the methodology, subdivided into the three detailed study blocks.

3.1. Analysis of the Initial Materials

First the CFP were analyzed. The CFP after treatment were subjected to a series of tests. The fundamental test for the study of its chemical composition is the elemental analysis, since it is an organic material. The results of this test are shown in Table 2.

Table 2. Elemental analysis of cellulose fibers discarded by the Paper Industry.

Sample	Nitrogen, %	Carbon, %	Hydrogen, %	Sulfur, %
CFP	0.447 ± 0.008	44.489 ± 0.325	5.884 ± 0.178	0.000 ± 0.000

The results reflect a main composition of Carbon and Hydrogen, as expected from a natural fiber. There is also a small amount of Nitrogen, unavoidable because of the type of byproduct, and is not of concern for its use. Sulfur, which could be one of the elements harmful to the bituminous mixture and the environment, does not appear in the fiber composition. Note that the sum of the four elements is not 100%, indicating that there are other inorganic chemical elements in the sample. Sodium may be one of them as the fiber has been washed with sodium hydroxide.

The Scanning Electron Microscope provided an image of the CFP with higher magnifications for this study. Figure 2 shows the image of the CFP in the secondary option obtained with the Scanning Electron Microscope.

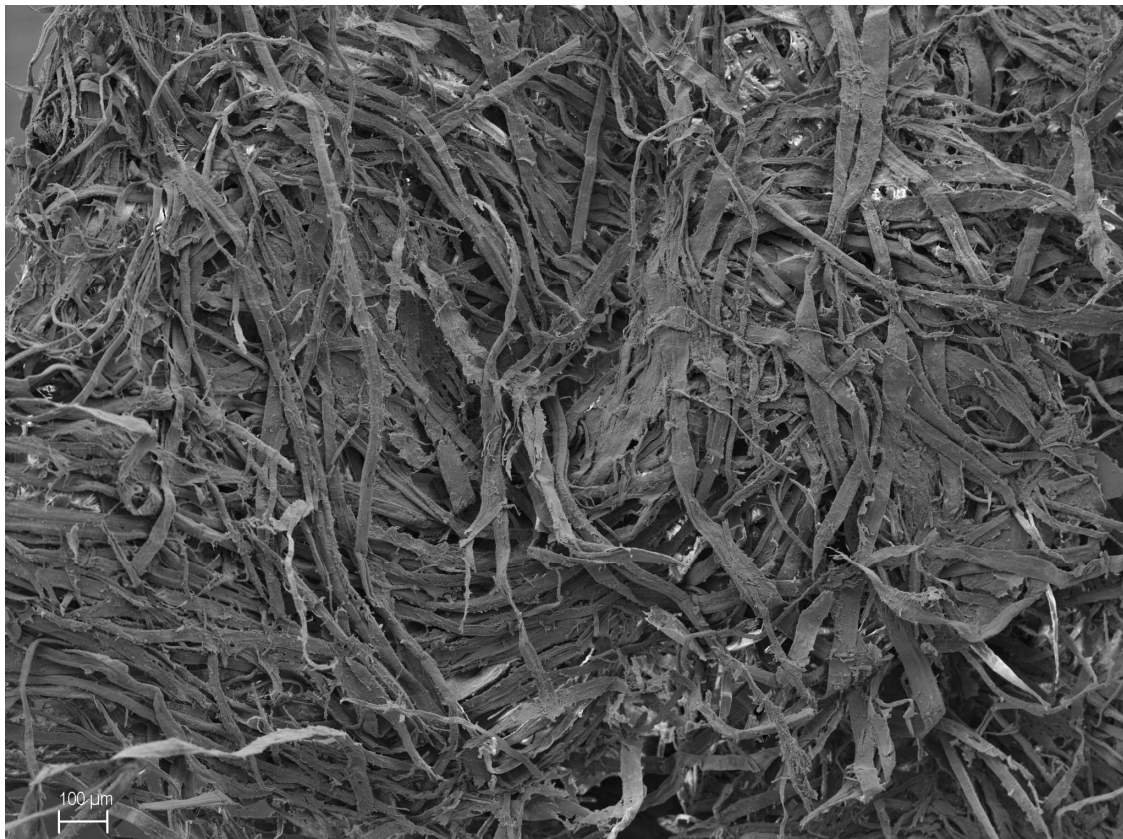


Figure 2. Image of the cellulose fibers of the Paper Industry obtained with the Scanning Electron Microscope in the secondary option.

The image of the cellulose fibers shows a similarity between them in terms of dimension and surface appearance. In addition, there are no gross fibers or fiber clusters that could damage the bituminous mixture due to incorrect distribution. The average size of the cellulose fibers measured by microscope corresponds to millimeters. They are therefore suitable for use in bituminous mixtures if

the mixing times with the emulsion established in the laboratory are respected and they are distributed homogeneously in the bituminous mixture.

The EAFS were also chemically analyzed through elemental analysis and X-ray fluorescence tests. The X-ray fluorescence test provides further information, as the material has an inorganic composition. The results of the elemental analysis of the EAFS are detailed in Table 3.

Table 3. Elemental analysis of electric arc furnace slag.

Sample	Nitrogen, %	Carbon, %	Hydrogen, %	Sulfur, %
EAFS	0.005 ± 0.000	0.164 ± 0.003	0.04460 ± 0.001	0.000 ± 0.000

The percentage of Carbon, Nitrogen and Hydrogen in the EAFS sample is very low, as the EAFS is an inorganic waste from the steelmaking Industry. It should be highlighted that there is no Sulfur, which makes the use of the EAFS as an aggregate for the bituminous mixture reliable without leachate problems.

The X-ray fluorescence test performed on the EAFS determined its inorganic composition. The results of the test are shown in Table 4.

Table 4. X-ray fluorescence of electric arc furnace slag.

Compound	Wt %	Est.Error
CaO	31.75	0.23
Fe ₂ O ₃	21.96	0.21
SiO ₂	17.52	0.19
Al ₂ O ₃	12.26	0.16
MnO	6.15	0.12
MgO	5.05	0.11
Cr ₂ O ₃	2.73	0.08
TiO ₂	0.955	0.047
BaO	0.658	0.033
P ₂ O ₅	0.319	0.016
SrO	0.186	0.0093
V ₂ O ₅	0.159	0.0079
Nb ₂ O ₅	0.0659	0.0033
S	0.0645	0.0032
ZrO ₂	0.0551	0.0028
K ₂ O	0.0289	0.0016
CuO	0.0254	0.0017
ZnO	0.0245	0.0016
Co ₃ O ₄	0.0147	0.0016
Eu ₂ O ₃	0.0137	0.0065
WO ₃	0.0104	0.0031
Y ₂ O ₃	0.0018	0.0005

The chemical composition of EAFS is directly derived from its formation process. A high percentage of iron is to be expected, as it comes from steel, as well as a high percentage of calcium oxide due to its addition to obtain the final material. Silicon and aluminum oxides are common in the scrap used for the manufacture of new steels. Magnesium, manganese and chromium are also common in the composition of steel. The other elements are found in such small percentages that they cannot be extrapolated. The very low percentage of sulfur ensures that the leachate from the EAFS does not pose an environmental problem, as is the case with other pollutants. Otherwise, we would have to study the leaching of these chemical pollutants and compare them with the limit values established by the regulations. It should be noted that the existence of oxides, mainly calcium oxide, in the unaltered sample of electric arc furnace slag does not cause any subsequent problems of expansion in contact with water. This fact is derived from the industrial process of slag formation—after extracting the

residue, the mixture is watered. In this way, a carbonate of the oxides is produced and therefore stability in its physical structure.

Once the CFP and the chemical composition of the EAFS were analyzed, the physical and mechanical properties were studied. As commented in the methodology, the tests were divided into two large groups depending on the size of the EAFS particles; on the one hand, the coarse and fine aggregate, and on the other, the mineral filler.

In the case of EAFS mineral filler, the particle density was $3076 \pm 77 \text{ kg/m}^3$. This density is higher than that of a conventional aggregate that has a density of around 2650 kg/m^3 . The higher density of the mineral filler of the EAFS makes it necessary to proportion by volume to make the correct combination of materials. On the other hand, the bulk density of the EAFS mineral powder showed the value of $700 \pm 50 \text{ kg/m}^3$. The mentioned density value was adequate for its use, reflecting that it is not a pulverulent material that could cause problems in its dosage.

The particle density of the coarse and fine aggregate of EAFS was made for all the grading fractions used in the grading curve for the formulation of the mixture, with these fractions being: 0.063–2 mm, 2–4 mm, 4–8 mm, 8–12.5 mm and 12.5–20 mm. In this way, volumetric corrections were made for each fraction and the mixture dosed as accurately as possible to its density. The results for each particle size fraction are shown in Table 5.

Table 5. Particle density of the different grading fractions of electric arc furnaces slags (EAFS).

Grading Fraction	Particle Density, kg/m^3
0.063–2 mm	3390 ± 92
2–4 mm	3356 ± 147
4–8 mm	3356 ± 121
8–12.5 mm	3199 ± 72

The densities of the different grading fractions differ from the density of a conventional aggregate, 2650 kg/m^3 , which is higher than the density of the EAFS. Volumetric correction is necessary for the dosage, thus ensuring that the percentage of emulsion is not excessive with respect to the aggregate if we proportion by weight.

The absorption coefficient for the coarse aggregate was also evaluated. The reason for carrying out this test was twofold: the calculation of the absorption of the emulsion in comparison with a conventional aggregate, and the study of the possible problems that a high absorption coefficient can trigger in the mineral skeleton of the bituminous mixture. The absorption coefficient of the coarse aggregate showed a value of $1.50 \pm 0.03\%$. As can be observed, the value of water absorption was slightly superior to 1%, so it should be taken into account in the dosage of the emulsion since it will absorb more. It could also cause problems due to freezing and thawing cycles in service. However, in order to fully determine its viability, the resistance of the EAFS to freezing and thawing cycles has been calculated.

The result of the fine aggregate sand equivalent test was $77 \pm 2\%$. The value is greater than 50%, and therefore the use of EAFS for bituminous mixtures is acceptable, as it does not contain a high percentage of colloidal particles that could cause future problems.

Conversely, the broken surfaces in coarse aggregate particles was calculated for EAFS with a result of $100 \pm 0\%$. The achievement of these excellent results is determined by the process of formation of the EAFS, since the shape derives from their formation process with oxygenation in the furnace, making them irregular and with various sharp edges. They are therefore excellent for working in this type of bituminous mixture that requires the formation of a strong and well-fitted mineral skeleton.

To complement the previous test, the flakiness index was calculated, showing a value of $0 \pm 0\%$. As in the previous test, these excellent results were obtained due to the process of EAFS formation. Therefore, there are particles of similar dimensions in the three axes, but with irregular surfaces typical of processes with high temperatures. This test, together with the previous one, shows the excellent

suitability of the EAFS for use in aggregates for bituminous mixtures with discontinuous granulometry, contingent on the results obtained in terms of their mechanical characteristics.

Finally, in order to evaluate the mechanical resistance of the EAFS, the tests of resistance to fragmentation and to the freezing and thawing cycles were carried out. The result of $13 \pm 1\%$ of the test of resistance to fragmentation makes the slag an ideal material for use in bituminous mixtures for roads, as well as in layers that are mechanically very demanding, such as the wearing course. In turn, the percentage of mass reduction of $0.551 \pm 0.016\%$ after the freezing thaw cycle test is negligible. Therefore, even if the EAFS has a slightly higher absorption coefficient than the established one, it can be seen that its mechanical behavior during the freezing and thawing cycles is ideal.

The previous tests have reflected the excellent suitability of the EAFS for the conformation of bituminous mixtures, not only in medium traffic roads, but also in roads with important traffic. However, a number of properties must be considered that, while not negative, may cause the bituminous mixture to fail if they were not known. Mainly, these are that the particle density and the absorption coefficient are higher than those of a conventional aggregate.

3.2. Conformation of the Different Groups of Samples and Tests

Once the suitability of the EAFS and CFP for the conformation of bituminous mixtures has been studied, the grading curve of the bituminous mixture is defined. The bituminous mixture to be developed is a discontinuous granulometry mixture with bituminous emulsion. The grading curve adopted has an intermediate composition between the upper and lower envelope for the coarse aggregate. On the other hand, and with the purpose of improving the useful life of the bituminous mixture and the resistance to tensile strength, as well as making it possible to absorb increasing percentages of bitumen, the proportion of fine aggregate was slightly increased with respect to the intermediate curve between the upper and lower grading envelope. The grading envelope for this bituminous mixture of discontinuous granulometry with a maximum aggregate size by 12 mm, as detailed in the Spanish regulations, was mentioned in the methodology [47]. The grading curve of the EAFS is detailed in Figure 3 below.

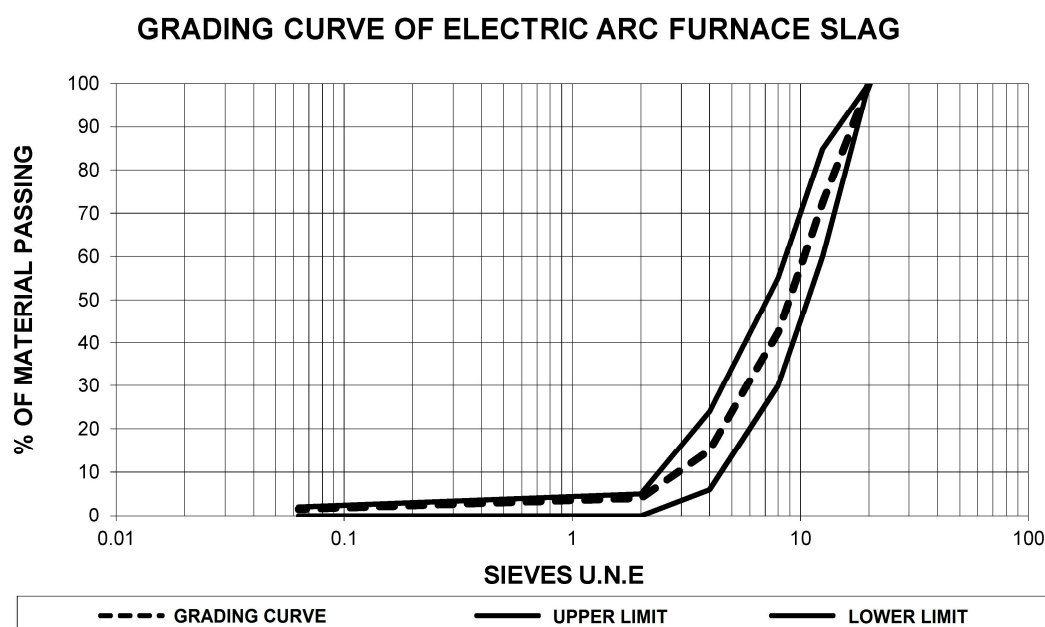


Figure 3. Graph of the grading curve of the EAFS referring to the grading envelope established by the regulations

For a conventional aggregate the density is approximately 2650 kg/m^3 , however, the EAFS has a density that differs from this value. Therefore, the appropriate volumetric corrections were made so as not to add excess emulsion with respect to the aggregate. The density corrections are those detailed in Table 6, also showing the necessary mass of EAFS for each grading fraction for the conformation of Marshall type samples with the established grading curve.

Table 6. Composition of the grading curve of EAFS for the manufacture of a Marshall type sample.

Sieve	% Passing	% Mass	Mass by Particle Size, g	EAFS Density, kg/m^3	EAFS Mass by Particle Size, g
20	100.0	0.0	0	-	0
12.5	72.5	27.5	275	3124	324
8	42.5	30.0	300	3199	362
4	15.0	27.5	275	3356	348
2	4.0	11.0	110	3356	139
0.063	1.5	2.5	25	3390	32
Filler	0.0	1.5	15	3076	17
Total	-	100.0	1000	-	1223

It is observed that the EAFS samples obtained a mass of 1223 g; to obtain a similar sample using conventional aggregate, it should be 1000 g. This fact must be taken into account not only in the dosing of the aggregate, but also in the dosing of the emulsion and the CFP in terms of the mass of a conventional aggregate test sample, that is, to the density of 2650 kg/m^3 .

Once the grading curve of the EAFS was determined, the compatibility of the EAFS with the bitumen emulsion was evaluated by means of the adhesivity test. This test distinguishes two types of adhesivity; one called immediate adhesivity and corresponding to the aggregate coating with the bitumen emulsion; and the other, aggregate-bitumen adhesivity by studying the aggregate coating by bitumen after the curing process and a 24 h period in water at a temperature of $60 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. Both values are measured quantitatively, expressing the percentage of EAFS coating by bitumen at the end of the test.

The emulsion used for this test and evaluated for use in bituminous mixtures is a medium breaking cationic bitumen emulsion, more specifically, and according to European standard C60BF3 MBA.

Figure 4 shows the image of the EAFS after the immediate adhesivity test with the aforementioned emulsion and the image of the aggregate-bitumen adhesivity. The result of the adhesivity test is shown in Table 7.

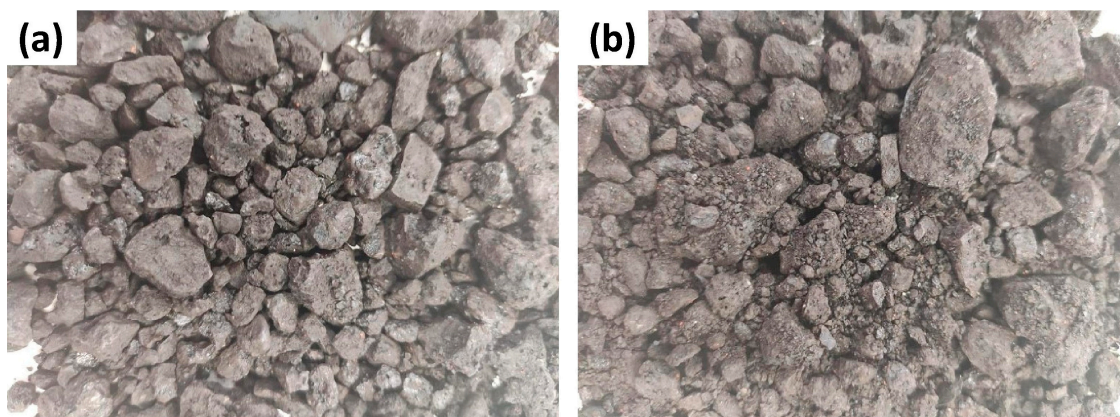


Figure 4. Adhesivity test of EAFS and bitumen emulsion C60BF3 MBA. (a) Immediate adhesivity emulsion—EAFS. (b) Adhesivity EAFS—bitumen (Right).

Table 7. Adhesivity test of EAFS and bituminous emulsion C60BF3 MBA.

Adhesivity Test	Value, %
% adhesivity of the EAFS to the emulsion. Immediate adhesivity	100
% adhesivity of the EAFS to the bitumen. Aggregate adhesivity—bitumen	100

Both adhesivity measures show an excellent behavior of the emulsion in conjugation with the EAFS, making the use of this emulsion suitable for the studied bituminous mixtures.

On the other hand, the formula provided by ATEB [48] in Equation (1) was used to calculate the percentage of emulsion needed for the AF12 bituminous mixture without CFP. This formula is based on the specific surface area of a conventional aggregate and is detailed below:

$$BR = (K/100) \cdot (1.5A + 2.5B + 4C + 6D + 9E + 12F), \quad (1)$$

where:

- BR = Proportion of residual bitumen on the dry mass of the aggregates.
- K = Coefficient of enrichment, the value of which is 1 in the wearing course and 0.9 in the lower course.
- A = Proportion of aggregates retained by the sieve UNE 20 mm.
- B = Proportion of aggregates passing through the sieve UNE 20 mm and is retained by the sieve UNE 8 mm.
- C = Proportion of aggregates passing through the sieve UNE 8 mm and is retained by the sieve UNE 4 mm.
- D = Proportion of aggregates passing through the sieve UNE 4 mm and is retained by the sieve UNE 2 mm.
- E = Proportion of aggregates passing through the sieve UNE 2 mm and is retained by the sieve UNE 0.063 mm.
- F = Proportion of aggregates passing through the sieve UNE 0.063 mm.

Applying this formula, taking into account a K factor of 0.1 and the values in Table 6 for the other coefficients, gives a bitumen percentage of approximately 3.6% aggregate. Therefore, the percentage of emulsion on aggregate must be calculated. As bitumen represents 60% of the emulsion, in Table 1, the percentage of emulsion is 6% over aggregate. The bituminous mixture with this percentage of emulsion and the detailed grading curve will be the initial one for the study.

It should be noted that the aim of this study is to develop a bituminous mixture with a higher percentage of bitumen due to the incorporation of CFP. In turn, EAFS has a higher absorption coefficient than conventional aggregate. Therefore, tests were made without the addition of CFP, with increasing percentages of bitumen, to observe exudation during the curing process. The percentage of bitumen, and consequently of bituminous emulsion, that led to exudations was the initial percentage for the study of bituminous mixtures with CFP. Therefore, their suitability was corroborated, as no exudation for that percentage occurred when CFP were added, and bituminous mixtures with increasing bitumen percentages of 0.5% were developed. The percentage of emulsion was increased until the breaking time of the bituminous mixture in its manufacture was inadequate, compaction was unacceptable or exudations of bitumen occurred during curing.

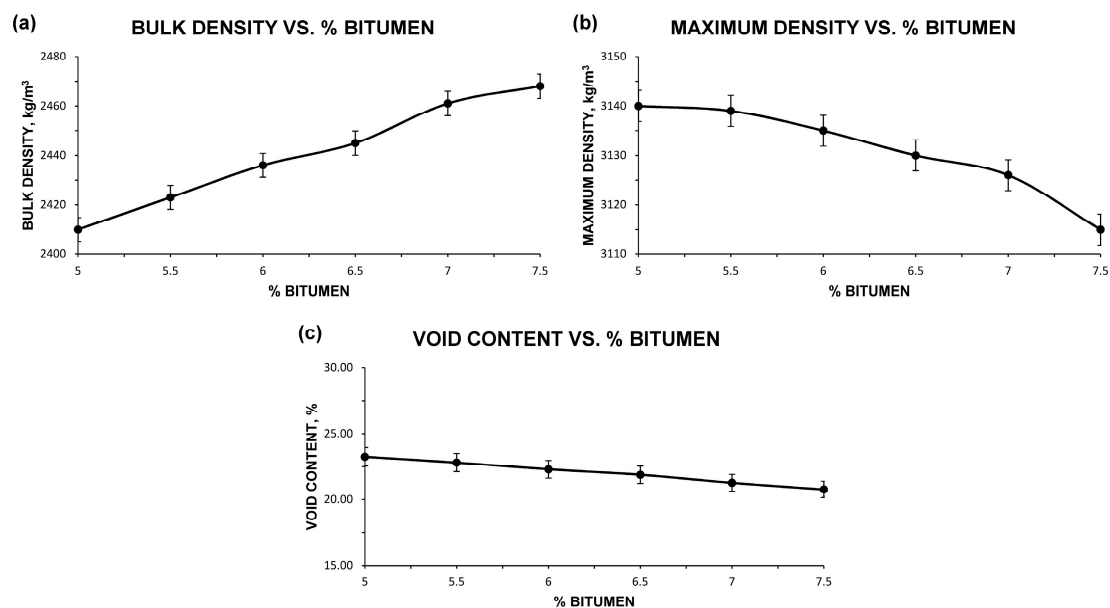
Based on the above, the CFP free samples with 8.3% emulsion and 5% bitumen produced exudation of bitumen during the two days of the oven curing process at 75 ± 2 °C and a further five days at 90 ± 2 °C. Therefore, this is the initial bitumen percentage for the study of new bituminous mixtures with CFP and increasing bitumen percentages of 0.5%.

To complete the information, the groups of samples that were manufactured with the addition of CFP for the tests mentioned in Table 8 are defined.

Table 8. Percentages of emulsion and bitumen for groups of samples conformed to bituminous mixtures with EAFS and cellulose fibers (CFP).

Group	Emulsion, %	Bitumen, %
A12F5.0	8.3	5.0
A12F5.5	9.2	5.5
A12F6.0	10.0	6.0
A12F6.5	10.8	6.5
A12F7.0	11.7	7.0
A12F7.5	12.5	7.5

Once the percentage of starting emulsion had been determined, the samples were manufactured with 0.5% CFP and increasing percentages of 0.5% bitumen. The process of compacting and curing the samples were as detailed previously. The breaking and curing times of the bituminous mixtures increased slightly with the increase in the percentage of bituminous emulsion, with the difference being negligible. For each group of samples manufactured, the physical properties were then determined, which were bulk density, maximum density and void content. Figure 5 shows the values obtained from the different tests to determine these physical properties of the different groups of samples with CFP and EAFS.

**Figure 5.** Graphs of physical properties of sample groups with EAFS, bitumen emulsion and CFP. (a) Bulk density, (b) maximum density and (c) void content.

As can be seen, the bulk density increases with the percentage of bitumen added. This is mainly due to the higher compaction possible with the increasing percentage of emulsion and the same compacting energy. The results of this physical parameter influence subsequent parameters such as the void content and, indirectly, the resistance characteristics.

Conversely, the maximum density of the samples is abnormally high compared to the densities of samples of similar mixtures made from conventional aggregate. This increase in density is obviously due to the use of EAFS for their conformation, which is not a problem in principle, but is a detail to be taken into account in their proportioning, storage and transport. The maximum density decreases with the increase in the percentage of bitumen, which is to be expected, as the density of bitumen is much lower than that of EAFS.

Finally, the void content results are high for all groups, with all of them being higher than 20%. This fact, far from being a disadvantage, is one of the properties pursued by the present study, since a

high content of voids in the bituminous mixture means a greater drainage capacity of the pavement in rainy periods, and at the same time, provides an excellent macrotexture. This macrotexture, together with the resistance of the EAFS, gives the wearing course a high level of safety. Also, the fact that it has a high content of voids in the bituminous mixture conditions the comfort of the road, since it absorbs the noise produced by the contact between the tire and the pavement. The disadvantage of a higher void content derives from the possible collapse of the bituminous mixture due to freezing and thawing cycles, or from the introduction of clayey material into the voids, i.e., problems caused by the loss of particles and breaking. This usual disadvantage in discontinuous bituminous mixtures with bitumen emulsion is compensated for with a higher percentage of bitumen provided by the CFP.

Once the good results of their physical properties were obtained, the loss of particles was evaluated, as mentioned previously, in order to study the influence of this high content of voids. The particle loss test was also carried out with a substantial modification in its procedure, namely with the immersion of the samples in water at 45 ± 1 °C for 24 h after curing and before testing. This test modification is shown in the NLT-362/92 standard and allows for an accurate evaluation of the adhesivity of the emulsion and the aggregate, as well as the influence of such a high percentage of void content. The values of the test results of the samples of each family, after their curing process and for the loss of particles without or with immersion, are detailed in Figure 6.

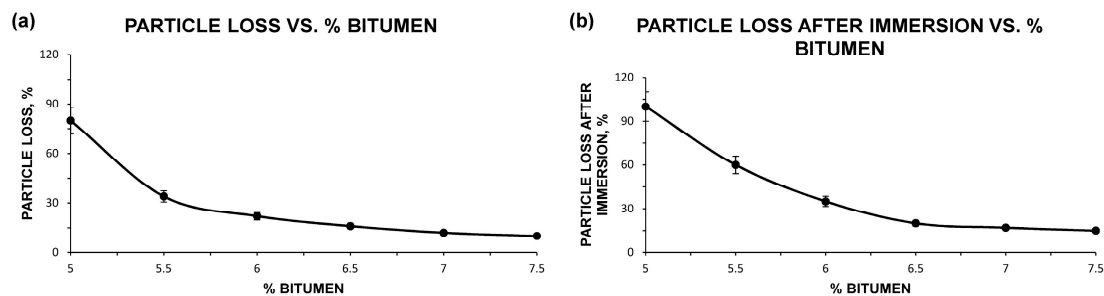


Figure 6. Graphs of the particle loss test of bituminous mixtures made with EAFS, bitumen emulsion and CFP. (a) Particle loss tests and (b) particle loss after immersion test.

The results of the nonimmersion particle loss test reflect a significant decrease for wear loss of dry bituminous mixtures with the addition of higher percentages of emulsion. This fact is logical if we think that a higher percentage of bitumen will enable a better coating of the aggregate and will also support better external loads.

As established in the Spanish regulations for this type of bituminous mixture with discontinuous grading, values lower than 25% are acceptable for this test [47]. The values from the A12F6.0 group are therefore acceptable results, with a percentage of bitumen of approximately 6%.

Conversely, subjecting the samples of the different groups to the conditions of the loss of particles test after immersion leads to worse results than the loss of particles test without immersion, with the loss being greater by this method in all groups of samples. If we take as a reference what is established by the Spanish regulations and value the bituminous mixture from a safety perspective, then only the A12F6.5, A12F7.0 and A12F7.5 groups have produced results lower than 25%, with these percentages being that to which the field of action is restricted. In the groups indicated as suitable, the difference between particle loss without immersion and after immersion is relatively low. This fact confirms the effectiveness of the bituminous mixtures obtained.

Finally, in order to fully characterize the bituminous mixture, a Marshall test was carried out on all the groups of samples. It should be noted that an increase in the percentage of bitumen will create a bituminous mixture that loses less particles due to wear, however, a higher percentage of bitumen can create important plastic deformations that are totally unacceptable. It is therefore the Marshall test that assesses this characteristic for all sample groups. The results of the Marshall test are shown in Figure 7.

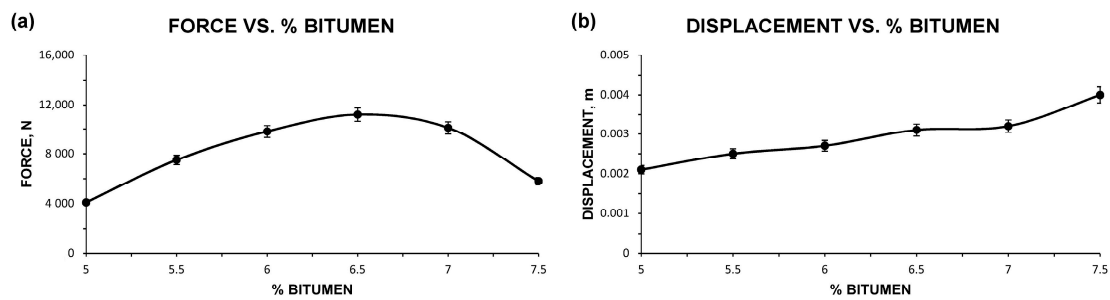


Figure 7. Graphs of the Marshall test for all families of samples with EAFS and CFP. (a) Force and (b) displacement.

First, it should be noted that the flow is obviously increasing with the percentage of bitumen added, but that all flow values are acceptable and even reduced compared to other types of bituminous mixtures. Conversely, and as established in the Spanish standards [47], a bituminous mixture with discontinuous grading or porous asphalt must provide a stability value in the Marshall test in excess of 7500 N. Based on this, it can be stated that all groups, with the exception of the first A12F5.0 and the last A12F7.5, are suitable according to this test and this limitation, even if they have very high percentages of bitumen in bituminous mixture and are impossible to carry out without the incorporation of CFP in bituminous mixture.

In addition, all bitumen mix samples after the Marshall test showed that the cellulose fibers were perfectly distributed, without agglomerations and coated with bitumen.

3.3. Optimal Combination of Materials and Obtention of Final Characteristics

The families of samples conformed with EAFS as coarse and fine aggregate and mineral filler had 0.5% CFP and increasing emulsion percentages from 8.3% to 12.5%. With this formulation, numerous samples of each group were made for each of the tests, after demonstrating the suitability of the emulsion for the EAFS coating. These tests generated a series of values that were compared with that established in the Spanish regulations General Technical Specifications for Roads of 1976 [47], in order to discard those groups that did not comply with any of the conditions.

The particle loss test removed the A12F5.0 and A12F5.5 groups, the Marshall test removed the A12F5.0 and A12F7.5 groups, and the immersion particle loss test removed the A12F5.0, A12F5.5 and A12F6.0 groups. Therefore, those bituminous mixtures corresponding to the formulations of the groups A12F6.5 and A12F7.0 would be suitable for manufacturing and spreading on roads.

Nevertheless, and with the idea of optimizing the materials to the maximum, it can be seen, how in the graph of the representation of the results of the Marshall stability with respect to the percentage of bitumen, there is a quadratic tendency delimiting a maximum value. This variation is conditioned by the percentage of bitumen, since a defect or an excess of bitumen can and does cause a reduction in Marshall stability. By approximating the series of points through a polynomial function and then obtaining the maximum in the interval under study, the optimum bitumen and emulsion dosage is calculated. This value is roughly in line with 6.5% bitumen and 10.8% emulsion (A12F6.5), as can be seen in the graph of Figure 7.

This will therefore be the optimum combination of materials, consisting of the aforementioned grading curve of the EAFS, a percentage of emulsion of 10.8% and an addition of CFP of 0.5% (percentages referring to the density of an aggregate of density 2650 kg/m³).

Therefore, the results of these tests for the optimal combination of materials are described in the Table 9.

Table 9. Results of all tests for the optimal combination of materials.

Optimal Combination of Materials 6.5% Bitumen y 0.5% cfp (Group 4)	
Bitumen emulsion about aggregate, %	10.8
Bitumen about aggregate, %	6.5
CFP about aggregate, %	0.5
Bulk density, kg/m ³	2445
Particle density, kg/m ³	3130
Void content, %	22.04
Loss of particles without immersion, %	16
Particle loss with immersion, %	20
Marshall stability, N	11,245
Marshall flow, m	0.0031
Wet Wear Loss, %	20

4. Conclusions

The tests carried out in the methodology reflect a series of partial conclusions that are detailed below and will serve to define the final conclusion. It is worth noting, the importance of using of waste has no use currently in the creation of bituminous mixtures, consuming large quantities of these materials and avoiding the extraction of virgin materials.

- Electric arc furnace slags are ideal for use in the proposed bituminous mixture, as well as for use on high traffic roads. The resistance to fragmentation, resistance to the freezing-thaw cycle and the absence of particles in the form of flakes or rounded, make the electric arc furnace slag an excellent aggregate for this purpose. It is also a very low price and environmentally friendly. At the same time, the lack of large quantities of contaminating chemical elements in its composition avoids later problems of leaching. However, its absorption coefficient and density are greater than those of a conventional aggregate, and must be taken into account for its dosage and use.
- Cellulose fibers do not show contaminating elements such as sulfur in their composition. This fact, as well as their uniform and individualized size and shape, have made possible the homogeneous distribution of them in the bituminous mixture absorbing important percentages of bitumen without producing exudations.
- Electric arc furnace slags as a fine aggregate and the higher percentage of bitumen in the bituminous mixture due to the incorporation of the fibers, has led to a suitable mastic capable of withstanding the tensile loads. In turn, the excellent resistance and shape of the coarse aggregate of the electric arc furnace slag has created a mineral skeleton in the bituminous mixture capable of withstanding the compressive loads of traffic. This fact can be seen in the good mechanical behavior of the bituminous mixture in the nonimmersion particle loss tests and postimmersion particle loss tests, as well as in the Marshall test.
- The bituminous mixture with discontinuous grading obtained with the optimal combination of bituminous emulsion, electric arc furnace slags and cellulose fibers has produced better results in the mechanical tests than those usually obtained for this type of bituminous mixture and required by the regulations. Fact derived from the use of both wastes.
- The high voids content, due to the discontinuous grading curve and formed mainly by coarse aggregate, makes the bituminous mixture ideal for most climates and low-cost district roads where it is not profitable to apply a porous asphalt but where a good road surface is essential in periods of rain, as the high voids content, together with the inclination of the subgrade, will allow water to be absorbed from the road surface and withdraw to the ditches.
- The void content favors the macrotexture of the bituminous mixture by the fitting of coarse aggregates, thus ensuring a safe and grippy surface for vehicles. In turn, these voids are capable of absorbing the noise of the pneumatic pavement contact, creating a comfortable road for the user.

- The bituminous mixture developed has a number of objective environmental advantages over traditional mixtures. Firstly, it uses waste from different industries, so gas emissions from the extraction of raw materials are reduced. Furthermore, the use of bitumen emulsion reduces gas emissions compared to the use of mixtures with bitumen. Finally, the creation of a comfortable and safe wearing course significantly reduces the fuel consumption of vehicles due to a deteriorated pavement.
- The bituminous mix developed is less expensive than a traditional bituminous mix. This cost reduction is mainly due to the use of waste instead of raw materials. At the same time, equipment for manufacturing bituminous mixtures with bituminous emulsion is much more economical, reducing the consumption of fossil fuels for heating the mixture. Obtaining a mix with a high percentage of bitumen creates a durable mix where the service life will be longer, reducing repair activities.

On the basis of the partial conclusions, it can be stated that a sustainable bituminous mixture has been achieved, with particular physical characteristics, with acceptable mechanical characteristics and with the use of waste from other industries and bituminous emulsion. This aim has been achieved because of the selection of the most suitable materials for this particular type of road, the selection of the most suitable and sustainable techniques, and the care in the critical points of the methodology with a continuous process of information feedback. It is therefore an example within the field of the circular economy, creating interesting solutions without harming the environment and without sacrificing the quality of the infrastructure

Author Contributions: Conceptualization, F.A.C.-I., F.J.I.-G., J.M.T.-S. and J.S.-M.; methodology, F.A.C.-I., F.J.I.-G., J.M.T.-S. and J.S.-M.; software, J.M.T.-S. and J.S.-M.; validation, F.A.C.-I. and F.J.I.-G.; formal analysis, F.A.C.-I. and F.J.I.-G.; investigation, J.M.T.-S. and J.S.-M.; resources, F.A.C.-I.; data curation, F.J.I.-G.; writing—original draft preparation, J.S.-M.; writing—review and editing, J.M.T.-S.; visualization, J.M.T.-S.; supervision, F.A.C.-I.; project administration, J.S.-M.; funding acquisition, F.A.C.-I. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Acknowledgments: Technical and human support provided by CICT of Universidad de Jaén (UJA, MINECO, Junta de Andalucía, FEDER) is gratefully acknowledged.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Plati, C. Sustainability factors in pavement materials, design, and preservation strategies: A literature review. *Constr. Build. Mater.* **2019**, *211*, 539–555. [[CrossRef](#)]
2. Mohd Hasan, M.R.; You, Z. Estimation of cumulative energy demand and green house gas emissions of ethanol foamed WMA using life cycle assessment analysis. *Constr. Build. Mater.* **2015**, *93*, 1117–1124. [[CrossRef](#)]
3. Al-Busaltan, S.; Al Nageim, H.; Atherton, W.; Sharples, G. Green Bituminous Asphalt relevant for highway and airfield pavement. *Constr. Build. Mater.* **2012**, *31*, 243–250. [[CrossRef](#)]
4. Zheng, X.; Easa, S.M.; Ji, T.; Jiang, Z. Incorporating uncertainty into life-cycle sustainability assessment of pavement alternatives. *J. Clean. Prod.* **2020**, *264*, 121466. [[CrossRef](#)]
5. Hartley, K.; van Santen, R.; Kirchherr, J. Policies for transitioning towards a circular economy: Expectations from the European Union (EU). *Resour. Conserv. Recycl.* **2020**, *155*, 104634. [[CrossRef](#)]
6. Hamzah, M.O.; Jamshidi, A.; Shahadan, Z. Evaluation of the potential of Sasobit® to reduce required heat energy and CO₂ emission in the asphalt industry. *J. Clean. Prod.* **2010**, *18*, 1859–1865. [[CrossRef](#)]
7. Almeida-Costa, A.; Benta, A. Economic and environmental impact study of warm mix asphalt compared to hot mix asphalt. *J. Clean. Prod.* **2016**, *112*, 2308–2317. [[CrossRef](#)]
8. Carpenter, A.C.; Gardner, K.H.; Fopiano, J.; Benson, C.H.; Edil, T.B. Life cycle based risk assessment of recycled materials in roadway construction. *Waste Manag.* **2007**, *27*, 1458–1464. [[CrossRef](#)]

9. Giani, M.I.; Dotelli, G.; Brandini, N.; Zampori, L. Comparative life cycle assessment of asphalt pavements using reclaimed asphalt, warm mix technology and cold in-place recycling. *Resour. Conserv. Recycl.* **2015**, *104*, 224–238. [[CrossRef](#)]
10. Dinis-Almeida, M.; Afonso, M.L. Warm Mix Recycled Asphalt—A sustainable solution. *J. Clean. Prod.* **2015**, *107*, 310–316. [[CrossRef](#)]
11. Morsetto, P. Targets for a circular economy. *Resour. Conserv. Recycl.* **2020**, *153*, 104553. [[CrossRef](#)]
12. Demirbas, A. Waste management, waste resource facilities and waste conversion processes. *Energy Convers. Manag.* **2011**, *52*, 1280–1287. [[CrossRef](#)]
13. Anthonissen, J.; Van den bergh, W.; Braet, J. Review and environmental impact assessment of green technologies for base courses in bituminous pavements. *Environ. Impact Assess. Rev.* **2016**, *60*, 139–147. [[CrossRef](#)]
14. Alkins, A.E.; Lane, B.; Kazmierowski, T. Sustainable Pavements. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* **2008**, *2084*, 100–103. [[CrossRef](#)]
15. Cottrill, C.D.; Derrible, S. Leveraging big data for the development of transport sustainability indicators. *J. Urban Technol.* **2015**, *22*, 45–64. [[CrossRef](#)]
16. Pérez-Martinez, P.J. Energy consumption and emissions from the road transport in Spain: A conceptual approach. *Transport* **2012**, *27*, 383–396. [[CrossRef](#)]
17. De Campos, R.S.; Simon, A.T.; De Campos Martins, F. Assessing the impacts of road freight transport on sustainability: A case study in the sugar-energy sector. *J. Clean. Prod.* **2019**, *220*, 995–1004. [[CrossRef](#)]
18. du Plessis, H.W.; Visser, A.T.; Curtayne, P.C. Fuel consumption of vehicles as affected by road-surface characteristics. In *Proceedings of the ASTM Special Technical Publication*; ASTM: West Conshohocken, PA, USA, 1990; pp. 480–496.
19. Nair Baskara, S.; Yaacob, H.; Hainin, M.R.; Hassan, S.A. Accident due to pavement condition—A review. *J. Teknol.* **2016**, *78*, 75–82. [[CrossRef](#)]
20. Tsubota, T.; Fernando, C.; Yoshii, T.; Shirayanagi, H. Effect of Road Pavement Types and Ages on Traffic Accident Risks. In *Proceedings of the Transportation Research Procedia*; Elsevier B.V.: Amsterdam, The Netherlands, 2018; Volume 34, pp. 211–218.
21. Rodríguez-Fernández, I.; Lizasoain-Arteaga, E.; Lastra-González, P.; Castro-Fresno, D. Mechanical, environmental and economic feasibility of highly sustainable porous asphalt mixtures. *Constr. Build. Mater.* **2020**, *251*, 118982. [[CrossRef](#)]
22. Lastra-González, P.; Calzada-Pérez, M.A.; Castro-Fresno, D.; Vega-Zamanillo, Á.; Indacochea-Vega, I. Comparative analysis of the performance of asphalt concretes modified by dry way with polymeric waste. *Constr. Build. Mater.* **2016**, *112*, 1133–1140. [[CrossRef](#)]
23. Picado-Santos, L.G.; Capitão, S.D.; Dias, J.L.F. Crumb rubber asphalt mixtures by dry process: Assessment after eight years of use on a low/medium trafficked pavement. *Constr. Build. Mater.* **2019**, *215*, 9–21. [[CrossRef](#)]
24. Zhang, K.; Luo, Y.; Chen, F.; Han, F. Performance evaluation of new warm mix asphalt and water stability of its mixture based on laboratory tests. *Constr. Build. Mater.* **2020**, *241*, 118017. [[CrossRef](#)]
25. Oda, S.; Leomar Fernandes, J.; Ildefonso, J.S. Analysis of use of natural fibers and asphalt rubber binder in discontinuous asphalt mixtures. *Constr. Build. Mater.* **2012**, *26*, 13–20. [[CrossRef](#)]
26. Bołtryk, M.; Falkowski, K.; Pawluczuk, E. A report on the fabrication of concrete pavement with the application of anionic bitumen emulsion. *Constr. Build. Mater.* **2017**, *154*, 1004–1014. [[CrossRef](#)]
27. Vaitkus, A.; Andriejauskas, T.; Vorobjovas, V.; Jagniatinskis, A.; Fiks, B.; Zofka, E. Asphalt wearing course optimization for road traffic noise reduction. *Constr. Build. Mater.* **2017**, *152*, 345–356. [[CrossRef](#)]
28. Donovan, P.R. Effect of Porous Pavement on Wayside Traffic Noise Levels. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* **2014**, *2403*, 28–36. [[CrossRef](#)]
29. Hu, J.; Qian, Z.; Wang, D.; Oeser, M. Influence of aggregate particles on mastic and air-voids in asphalt concrete. *Constr. Build. Mater.* **2015**, *93*, 1–9. [[CrossRef](#)]
30. Yan, K.; Sun, H.; You, L.; Wu, S. Characteristics of waste tire rubber (WTR) and amorphous poly alpha olefin (APAO) compound modified porous asphalt mixtures. *Constr. Build. Mater.* **2020**, *253*, 119071. [[CrossRef](#)]
31. Jiang, W.; Sha, A.; Xiao, J.; Li, Y.; Huang, Y. Experimental study on filtration effect and mechanism of pavement runoff in permeable asphalt pavement. *Constr. Build. Mater.* **2015**, *100*, 102–110. [[CrossRef](#)]

32. Yan, B.; Mao, H.; Zhong, S.; Zhang, P.; Zhang, X. Experimental study on wet skid resistance of asphalt pavements in icy conditions. *Materials* **2019**, *12*, 1201. [[CrossRef](#)]
33. Ameri, M.; Hesami, S.; Goli, H. Laboratory evaluation of warm mix asphalt mixtures containing electric arc furnace (EAF) steel slag. *Constr. Build. Mater.* **2013**, *49*, 611–617. [[CrossRef](#)]
34. Kim, Y.; Lim, J.; Lee, M.; Kwon, S.; Hwang, S.; Lee, J. Comprehensive Evaluation of Warm SMA Using Wax-Based WMA Additive in Korea. *J. Test. Eval.* **2015**, *43*, 20130144. [[CrossRef](#)]
35. Behbahani, H.; Nowbakht, S.; Fazaeli, H.; Rahmani, J. Effects of fiber type and content on the rutting performance of Stone matrix asphalt. *J. Appl. Sci.* **2009**, *9*, 1980–1984.
36. Sadeghian, M.; Latifi Namin, M.; Goli, H. Evaluation of the fatigue failure and recovery of SMA mixtures with cellulose fiber and with SBS modifier. *Constr. Build. Mater.* **2019**, *226*, 818–826. [[CrossRef](#)]
37. Wu, S.; Xue, Y.; Ye, Q.; Chen, Y. Utilization of steel slag as aggregates for stone mastic asphalt (SMA) mixtures. *Build. Environ.* **2007**, *42*, 2580–2585. [[CrossRef](#)]
38. Skaf, M.; Manso, J.M.; Aragón, Á.; Fuente-Alonso, J.A.; Ortega-López, V. EAF slag in asphalt mixes: A brief review of its possible re-use. *Resour. Conserv. Recycl.* **2017**, *120*, 176–185. [[CrossRef](#)]
39. Yu, T.; Zhang, H.; Wang, Y. Interaction of asphalt and water between porous asphalt pavement voids with different aging stage and its significance to drainage. *Constr. Build. Mater.* **2020**, *252*, 119085. [[CrossRef](#)]
40. Pattanaik, M.L.; Choudhary, R.; Kumar, B. Clogging evaluation of open graded friction course mixes with EAF steel slag and modified binders. *Constr. Build. Mater.* **2018**, *159*, 220–233. [[CrossRef](#)]
41. Zalnezhad, M.; Hesami, E. Effect of steel slag aggregate and bitumen emulsion types on the performance of microsurfacing mixture. *J. Traffic Transp. Eng.* **2020**, *7*, 215–226. [[CrossRef](#)]
42. Shanbara, H.K.; Ruddock, F.; Atherton, W. A laboratory study of high-performance cold mix asphalt mixtures reinforced with natural and synthetic fibres. *Constr. Build. Mater.* **2018**, *172*, 166–175. [[CrossRef](#)]
43. Amuchi, M.; Abtahi, S.M.; Koosha, B.; Hejazi, S.M.; Sheikhzeinoddin, H. Reinforcement of steel-slag asphalt concrete using polypropylene fibers. *J. Ind. Text.* **2015**, *44*, 526–541. [[CrossRef](#)]
44. Muhmood, L.; Vitta, S.; Venkateswaran, D. Cementitious and pozzolanic behavior of electric arc furnace steel slags. *Cem. Concr. Res.* **2009**, *39*, 102–109. [[CrossRef](#)]
45. Liu, C.; Zha, K.; Chen, D. Possibility of concrete prepared with steel slag as fine and coarse aggregates: A preliminary study. In *Proceedings of the Procedia Engineering*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2011; Volume 24, pp. 412–416.
46. Ilangovan, M.; Guna, V.; Prajwal, B.; Jiang, Q.; Reddy, N. Extraction and characterisation of natural cellulose fibers from *Kigelia africana*. *Carbohydr. Polym.* **2020**, *236*, 115996. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
47. BOE.es—Documento BOE-A-1976-13091. Available online: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1976-13091> (accessed on 13 September 2020).
48. Soto, J.A.; Nebreda, J. Mezclas Abiertas En Frío. Available online: <https://victoryepes.blogs.upv.es/tag/mezclas-bituminosas-en-frio/> (accessed on 25 August 2020).
49. Fibras de Celulosa Aditivas Para Mezclas Tipo SMA Con Propiedades Mejoradas. Available online: <https://www.asefma.es/comunicacion-fibras-de-celulosa-aditivas-para-mezclas-tipo-sma-con-propiedades-mejoradas/> (accessed on 13 September 2020).



Article

Development of Slurry Surfacing with Electric Arc Furnace Slag for Pavements with Friction Problems

Juan María Terrones-Saeta ^{*}, Jorge Suárez-Macías , Francisco Javier Iglesias-Godino and Francisco Antonio Corpas-Iglesias 

Department of Chemical, Environmental, and Materials Engineering, Higher Polytechnic School of Linares, University of Jaen, Scientific and Technological Campus of Linares, 23700 Linares, Jaen, Spain; jsuarez@ujaen.es (J.S.-M.); figodino@ujaen.es (F.J.I.-G.); facorpas@ujaen.es (F.A.C.-I.)

* Correspondence: terrones@ujaen.es; Tel.: +34-675-201-939

Received: 20 August 2020; Accepted: 28 September 2020; Published: 1 October 2020



Abstract: Pavement maintenance is an essential activity for maintaining the quality of the pavements. It is common for the ageing pavement to present problems of friction, so a proper solution must be provided. In this work, electric arc furnace slags are incorporated in slurry surfacing to provide adequate friction with this technique. The electric arc furnace slag was studied with physical, chemical, and mechanical tests to evaluate its suitability in the formation of the bituminous mixture. At the same time, different groups of samples were made with increasing percentages of bitumen emulsion and slag as coarse aggregate, determining the wear of the different families and the cohesion. The results reflected the excellent characteristics of the electric arc furnace slags, and an optimal combination of materials (slag, aggregate, water, and bitumen emulsion) could be obtained to develop slurry surfacing applicable to important traffic roads. This provided a use for the electric arc furnace slag in which its mechanical properties were used and a sustainable bituminous mixture with excellent characteristics and respectful of the environment was developed.

Keywords: slurry surfacing; electric arc furnace slag; bitumen emulsion; friction; sustainability; pavement

1. Introduction

Pavement maintenance is one of the primary activities within road infrastructures. It is common to design and build pavements with high performance and large investments that are not subsequently cared for in their useful life. On the other hand, the pavement is an element that suffers throughout its service life, whether due to the loads of heavy traffic, vehicles, or exposure to the elements [1,2]. Consequently, the characteristics that it had at the beginning of its construction have not been maintained unchanged during time. Maintenance work is mandatory.

These maintenance tasks are not always carried out properly. The low availability of investment, the non-technical considerations in the investment, and the passage of time mean these tasks are not developed [3]. However, the lack of adequate maintenance in the pavement encourages the deterioration produced to grow exponentially, so the cost of these tasks in subsequent years will increase rapidly.

In response to this problem, it is essential to develop maintenance activities that extend the useful life of the pavement, are carried out regularly, and do not entail a high economic cost.

Furthermore, pavement ageing manifests itself in different ways [4], not always similar, and depending to a large extent on the materials used and the execution process followed. A very aged pavement will display surface cracks with irregular shapes and will imply structural exhaustion of the pavement. However, it is also common to find a pavement that does not have these defects but

does have a very low coefficient of friction. In other words, the continuous passage of vehicles wears the surface layer and causes the macrotexture and microtexture of the pavement to lose the necessary friction of vehicle tires [5]. Consequently, this decreases coarse aggregate microtexture significantly and creates an unsafe surface for traffic [6], even more so in the rainy season.

This fact is mainly due to the aggregates used in the bituminous mix that, because they do not have resistance to polishing, because they do not have an adequate resistance, or simply because, for an extended period of use, have lost the surface roughness to condition a comfortable and safe running surface.

The solution to this type of problem is found in slurry surfacing, mainly. There are other types of techniques to correct the problem of friction, but the ease of execution of this technique, the rapid openness to traffic, and the manufacture of the asphalt mix at ambient temperature [7] make it an excellent solution [8].

Slurry surfacing is an asphalt mixture containing mainly aggregates (coarse aggregate in high proportion), bitumen emulsion, water, and additives. Its extension is fast about on the pavement performing the standardized mixing, extension, and compaction by the same machinery. In turn, the opening to traffic is usually in a short period of time, thus avoiding interaction with traffic and safety problems.

This type of mixture, with an important percentage of coarse aggregate of a maximum size of 8 mm or 11 mm, achieves a layer on the surface of the pavement of reduced thickness (the thickness being approximately equal to the maximum aggregate size) and with high friction between the vehicle (tire) and the pavement. It is therefore an ideal solution for the recovery of pavements that have lost part of their roughness or friction but still have sufficient structural characteristics to support the loads of traffic. In other words, it is neither a structural nor a resistant layer; however, if there were a series of cracks in the aged pavement, this treatment could maintain the union of the crack and, in turn, prevent water from penetrating into the pavement causing major problems. In addition, the cost of this surface treatment is much lower than that of a traditional bituminous mixture, due to its reduced thickness and the fact that it is not necessary to mill the most superficial layer of the pavement for its execution.

Therefore, this surface treatment obviously needs an aggregate of sufficient quality to maintain the friction during the continuous passage of vehicles, and adequate adhesion to the emulsion so that no problems of raveling occur [9]. The aggregate used has usually been of a siliceous nature to obtain greater abrasion and resistance.

In line with the above, and in order to find sustainable solutions that reduce the environmental impact [10], reduce greenhouse gas emissions, and reduce waste deposition in landfills [11,12], this study uses electric arc furnace slag as the surface treatment. It should be noted that the construction sector, and more specifically the pavement sector, is the sector with the greatest environmental impact [13]. This is mainly due to the huge dimensions of the infrastructures, the high volumes of virgin materials used, and the manufacturing processes that are not very optimized, as most bituminous mix manufacturing plants employ fossil fuels to heat the mix with the associated greenhouse gas emissions.

Electric arc furnace slag is a waste product of the steel industry in the manufacture of steel from scrap [14]. This process has different phases, mainly fusion and refining, which are developed in different furnaces and achieve different effects on the material. The first stage of fusion takes place in the electric arc furnace, where oxidation (for the elimination of manganese and silicon), dephosphorization, and the formation of slag, in which impurities are accumulated, take place. This slag is removed, cooled with water, and called as electric arc furnace slag. On the other hand, in the subsequent refining stage, the ladle furnace slag is produced, which is not used in this work.

Analyzing the surface treatment developed in this research according to objective criteria and relating to sustainability and production economy, a series of advantages of the present project are obtained in comparison with traditional techniques. According to environmental criteria, the reduction in the consumption of raw materials, such as aggregates, through the use of electric arc furnace slag means a significant reduction in greenhouse gas emissions and environmental impact. This is due

to the fact that the work of extracting aggregates is reduced, with the reduction in emissions from machinery and the impact caused by the producing quarries. On the other hand, the deposition of industrial waste such as slag in a landfill is avoided, providing a new use for it. At the same time, the implementation of a technique with bitumen emulsion makes it possible to avoid heating the bitumen mixture to high temperatures, thus reducing the consumption of fossil fuels. Finally, its direct execution without the need to mill the existing pavement makes it possible to reduce machinery and emissions. In short, and under the aforementioned objective criteria, it can be stated that the use of this research has a positive influence on sustainability and the environment.

On the other hand, and according to economic criteria, the use of a waste in a significant percentage implies a reduction in the cost of the technique, since the price of the slag is lower than that of a quality siliceous aggregate. The conformation of the bituminous mixture is carried out with more economical equipment than those currently used for mixtures with bitumen, and there is also a reduction in fuel consumption due to the non-heating of the mixture. In addition, the extension is fast on the pavement, reducing the costs of operators and machinery, as well as traffic cuts. All these factors have a significant influence on the lower cost of carrying out this research as opposed to traditional techniques.

For the success of this surface treatment, it is essential to achieve two fundamental objectives: on the one hand, that the electric arc furnace slag shows adequate resistance characteristics [15], and in addition, that the emulsion does not have adhesion problems with the slag and that the process is carried out correctly. These parameters are quantified in this study and are evaluated with different tests.

Based on the above, this paper presents the study of the incorporation of electric arc furnace slag in high-friction surface treatments. For this purpose, the slag was chemically analyzed, obtaining its chemical composition; its grading was analyzed, to study the percentage of silica sand in addition to fit the grading curve within the grading envelope defined by the standard; and the physical and mechanical characteristics of the electric arc furnace slag and the addition silica aggregate were evaluated. Once the suitability of the materials was evaluated, different samples were manufactured with increasing percentages of emulsion until acceptable results were obtained. With the results obtained from the different families of samples, the optimal combination of materials reflecting the best properties was defined, and therefore, it will be the most suitable for its execution.

The different test results showed the suitability of electric arc furnace slag for the production of bituminous mixtures. An optimal combination of materials (electric arc furnace slag, silica sand, bitumen emulsion, and water) was obtained, giving the asphalt mixture excellent physical and strength characteristics. This demonstrates the feasibility of using the slag as an aggregate for slurry surfacing.

It should be noted that there are different national standards for the use of this construction technique. However, given the profusion of this type of asphalt mixture in Spain and the great number of successes obtained, the Spanish standard ORDER FOM/2523/2014 [16] is used to evaluate the suitability of the surface treatment designed.

2. Materials and Methods

This section describes the materials used as well as the methodology followed to study the suitability of developing surface treatments for pavements with electric arc furnace slag and bitumen emulsion.

2.1. Materials

The materials used are those described in this section. It must be taken into account that each one of them performs a function within the asphalt mixture, and therefore, there must be compatibility between all of them for the mixture to be suitable. In order to understand the function of each of the materials used, in the following sections it describes their origin, formation, and general characteristics, and then in the methodology, the tests that have been carried out to study their suitability as a whole.

2.1.1. Electric Arc Furnace Slag

The electric arc furnace slag (EAFS) comes from the steel industry located in Andalusia, Spain. These companies are engaged in the manufacture of steel from soft iron or steel scrap. Therefore, the process is similar over time, and consequently, the physical, mechanical, and chemical properties of the EAFS will be relatively stable. This fact is fundamental for the use of a waste. The slag has been received directly from the factory without any variation in grading, humidity, or other conditions that could alter the sample.

2.1.2. Silica Sand

The silica sand belongs, like the electric arc furnace slag, to the area of Andalusia, Spain. They come from the crushing of siliceous rocks and have been traditionally used in surface treatments. This is due to the good resistance they offer as well as the adequate adhesion with the bitumen emulsion. The physical properties will be determined later in the tests carried out in the methodology, evaluating their suitability as well as compatibility with the slags and the emulsion.

2.1.3. Bitumen Emulsion

The bitumen emulsion used is the one named according to the European standard [17] as C60B4 MIC. It is an emulsion traditionally used and currently used for surface treatments, of a cationic nature and slow breaking times. The cationic nature makes it suitable for the breaking of the emulsion in contact with the siliceous aggregates, so it is discarded the use of emulsions of anionic nature. The slow breaking time conditions the adequate time for the coating of all the aggregates, fine and course, and the correct adhesion with them. Shorter breaking times, such as medium or fast, would result in incorrect coating of the aggregate. The commercial reference of the bituminous emulsion is detailed in Table 1.

Table 1. Commercial reference of the bituminous emulsion C60B4 MIC.

Characteristics	Unit	Standard	Min.	Max.
Original Emulsion				
Particle polarity	-	UNE EN 1430 [18]	Positive	
Breaking value (Forshammer filler)	-	UNE EN 13075-1 [19]	110	195
Efflux time (2 mm, 40 °C)	s	UNE EN 12846 [20]	15	70
Binder content (per water content)	%	UNE EN 1428 [21]	58	62
Residue on sieving (0.5 mm)	%	UNE EN 1429 [22]	-	0.10
Setting tendency (7 days storage)	%	UNE EN 12847 [23]	-	10
Water effect of binder adhesion	%	UNE EN 13614 [24]	90	-
Binder after distillation (UNE EN 1431) [25]				
Penetration (25 °C; 100 g; 5 s)	0.1 mm	UNE EN 1426 [26]	-	100
Softening point	°C	UNE EN 1427 [27]	43	-
Evaporation residue (UNE EN 13074-1) [28]				
Penetration (25 °C; 100 g; 5 s)	0.1 mm	UNE EN 1426 [26]	-	100
Softening point	°C	UNE EN 1427 [27]	43	-
Stabilizing residue (UNE EN 13074-2) [29]				
Penetration (25 °C; 100 g; 5 s)	0.1 mm	UNE EN 1426 [26]	-	100
Softening point	°C	UNE EN 1427 [27]	43	-

2.1.4. Additive

The main function of the additive is to modify the breaking times of the emulsion, and consequently, to vary the working times of the asphalt mixture. The emulsion breaking time is essential in surface treatments. A short emulsion breaking time would result in poor workability of the mix and incorrect

spreading, thus not spreading homogeneously and not producing adequate adhesion with the surface course of the aged pavement. On the other hand, long breaking times would result in the mixture not acquiring the properties of strength and cohesion in a short period of time, thus delaying the work of opening the pavement to traffic. The additives are usually made up of soaps, emulsifiers, and natural resins. Added to the mix in percentages between 0% and 2%, they control the emulsion breaking time, adapting it to the working times and even to the weather. It is a fundamental tool used in this work.

2.1.5. Water

The water used in this project is distilled water, in order not to induce more study variables and to maintain the purity of the methodology. Water plays a fundamental role in the bituminous mixture, since its addition prior to the emulsion makes it possible to achieve longer breaking times and to produce a homogeneous mixture with the bitumen emulsion, facilitating its spreading. It, therefore, makes it possible for the viscosity of the bituminous mix to be reduced and for the bitumen emulsion to adhere properly to the aggregate. The water used in the execution of the surface treatment on the pavement must be analyzed. Mainly the sulphate and chlorine content must be monitored, as well as the pH [16].

2.2. Methodology

The methodology of this project comprises a series of logical and ordered tests in order to determine all possible properties of the materials and the mixture; thus, achieving the development of high-friction surface treatments with electric arc furnace slags.

For this purpose, electric arc furnace slag and silica sand first were dried at a temperature of 105 ± 2 °C for 24 h to remove the humidity. The elimination of the humidity is carried out with the aim of reducing the variables under study. However, the existence of humidity in the aggregates in the factory does not represent a problem, it should simply be taken into account to modify the pre-coating water. The dry materials will be the ones used in the whole methodology.

Chemical analysis of the electric arc furnace slag as a waste is essential. Elemental analysis and X-ray fluorescence tests will determine its composition, and ultimately its suitability for the intended purpose. Essentially, the detection of the polluting elements present and the chemical elements could cause problems in the bituminous mixture.

Subsequently, the physical and mechanical properties of the electric arc furnace slag, as well as of the silica sand, were studied. In these tests, the particular characteristics of the slags were evaluated in order to take appropriate remedial action. The physical and mechanical tests were divided into three main sections: coarse aggregate, fine aggregate, and filler.

After evaluating the characteristics of the electric arc furnace slags, we studied the percentage of combinations of both aggregates from the grading curve of the same. This combination of materials was tested with different percentages of emulsion and water, in order to determine the minimum abrasion loss in the test.

Finally, the emulsion breaking times and the cohesion of the surface treatment were adjusted for opening to traffic. The optimum combination of materials was the one that obtained the best properties in the different tests and the lowest economic and environmental cost.

The following sections describe the methodology divided into three main blocks: analysis of electric arc furnace slags, conformation of the bituminous mix and testing, and optimal combination of materials.

2.2.1. Analysis of Electric Arc Furnace Slags

The materials under study, electric-arc furnace slag, and silica sand, after removal of moisture, were subjected to a series of chemical, physical, and mechanical tests to assess their suitability.

On the one side, the electric arc furnace slag was chemically analyzed for the detection of contaminating elements or elements that could damage the final mixture. For them, the elemental

analysis test was performed, completely burning the sample and analyzing the gases for the detection of hydrogen, nitrogen, carbon, and sulfur. The equipment used for this purpose was the TruSpec Micro model of the commercial brand Leco. On the other side, X-ray fluorescence provided the elemental composition of the electric arc furnace slag thanks to the use of the commercial equipment ADVANT'XP+ of the Thermo Fisher brand. These chemical tests are essential to ascertain the composition and therefore to ensure that there are no problems with the leaching of pollutants [16].

Once the chemical composition of the slag had been defined and the presence of chemical elements that could cause problems had been evaluated, the physical and mechanical properties of the electric arc furnace slag and the silica sand were studied. The slags were divided according to particle size, filler, fine aggregate, or coarse aggregate.

The tests carried out on the filler of both materials were those of particle density (standard UNE-EN 1097-7) [30] and apparent density in kerosene (standard UNE-EN 1097-3) [31]. The density of the particles was evaluated by the pycnometer method with water, studying with successive measurements of mass and volume the density of the filler of both materials. Moreover, the density of the filler in kerosene indicated how powdery a material is, since a powdery material would cause dosage problems.

The fine aggregate, both of the electric arc furnace slag and of the silica sand, was tested for sand equivalent (standard UNE-EN 933-8) [32]. The sand equivalent test determines the percentage of colloidal particles in the aggregate under study. After a flocculation and coagulation process, the proportion of these particles was measured. It was therefore an essential test to avoid undesired problems of expansivity due to clayey materials.

The coarse aggregate, formed mainly by the slag of electric arc furnace, was responsible for providing sufficient friction to the pavement to prevent the sliding of the vehicles. It was therefore the material that must provide the appropriate characteristics of durability. Based on this, the physical tests carried out on the electric arc furnace slag were the calculation of the percentage of crushed surfaces (standard UNE-EN 933-5) [33] and the flakiness index (standard UNE-EN 933-3) [34]. These tests visually evaluated two fundamental characteristics of the aggregate for the friction of the surface treatment. In turn, resistance was evaluated through the tests of resistance to fragmentation (standard UNE-EN 1097-2) [35], resistance to freeze–thaw cycles (standard UNE-EN 1367-1) [36], and determination of the polished stone value (standard UNE-EN 1097-8) [37].

In this way, and after carrying out all the mentioned tests, the electric arc furnace slag and silica sand were defined for the correct conformation of the bituminous mixture, the evaluation of the absence of expansion problems and the study of the appropriate resistance for surface treatment.

2.2.2. Conformation of the Bituminous Mix and Testing

Once the chemical, physical, and mechanical suitability of the electric arc furnace slag and silica sand had been evaluated, the bituminous mixture was conformed.

As previously mentioned, the Spanish standard was used for this type of asphalt mixes given the great profusion that this type of technique has obtained in Spain and the number of successes that have accumulated in its manufacture. This standard is ORDER FOM/2523/2014 [16]. This document details a grading envelope for slurry surfacing manufactured with a maximum aggregate size of 8 mm. This grading envelope is the one used in the present study, being the grading curve of the electric arc furnace slag and the silica sand inside its limits. For this purpose, initially the particle size of the electric arc furnace slag and the silica sand were analyzed. As the electric arc furnace slag contained particles with sizes above 8 mm, these particles were removed by sieving leaving the particle distribution below 8 mm unchanged. The silica sand obviously does not contain particles larger than 6 mm.

With the curves of both materials, the final grading curve was conformed corresponding to the combination of the electric arc furnace slag and the silica sand. This curve was obviously inside the grading envelope. It should be noted that the function of the materials is very different; on the one hand, the slag provides the larger sizes and causes the tire to friction to the pavement. Furthermore,

the silica sand, together with the emulsion, is in charge of supporting the traction and shear loads that may be induced in the pavement.

The above-mentioned standard defines the intervals of addition of the pre-coating water and the emulsion. These intervals are 10% to 15% for water and 6% to 8% for bitumen. It should be noted that the emulsion is composed of bitumen, which will remain in the mix after curing, and water, which facilitates the conforming operations at ambient temperature and is eliminated after breaking the emulsion by evaporation. It is therefore the bitumen that provides the mechanical characteristics of the bituminous mix. The change between bitumen and emulsion percentages is immediate with the knowledge of the bitumen emulsion data sheet. On the other hand, the percentages of emulsion, bitumen, water, and additive will always be defined in this document as percentages by mass over the total mass of aggregates (electric arc furnace slag plus silica sand).

The emulsion's ability to adhere to the aggregates was tested with the coating test according to the Spanish standard NLT-196/84 [38]. The test consisted of mixing the aggregated material with the pre-coating water and the bituminous emulsion in the average percentages of the defined intervals. It was mixed until breaking and poured on a filter paper to evaluate the adhesion of the bitumen emulsion and the aggregates. Water was then added to the rest of the bituminous mix in large quantities and re-sprinkled on the filter paper, thus evaluating the effect of water on the adhesion of the aggregate to the bitumen emulsion.

After studying the suitability of the bitumen emulsion, the mixtures were manufactured with different percentages of pre-coating water and bitumen emulsion. The percentage of water referred to in the standard, between 10% and 15%, corresponds to the water of the pre-coating and the water of the bitumen emulsion. This percentage of water was set at 12.5%, with the double purpose of not inducing more study variables, and on the other hand, to provide an intermediate percentage of water between the maximum and minimum values. The percentage of bitumen should be between 6% and 8%, therefore three families of test samples were made with bitumen percentages of 6%, 7%, and 8%. The bitumen, emulsion, and water percentages are listed in Table 2 for the three families.

Table 2. Percentages of bitumen, bitumen emulsion, and water of the different families of samples formed.

Percentages	MIC1	MIC2	MIC3
% bitumen	6	7	8
% bitumen emulsion	10.0	11.7	13.3
% water in the emulsion	4.0	4.7	5.3
% pre-coating water	8.5	7.8	7.2
% mixing water	12.5	12.5	12.5

Once the families were defined, the water wearing test was performed according to the UNE-EN 12274-5 [39] standard on all the samples of each family of asphalt mixtures. The test consists of subjecting a test specimen of cured bituminous mix for a specific time and immersed in water at 25 ± 1 °C, to the action of a rubber roller that rotates on the surface of the mix. Later, the sample is extracted and the variation of the mass is calculated, determining the loss by wearing. It is therefore a test that offers reliable results of the behavior of the asphalt. The results of this test for the three families were compared with the maximum results permitted by the Spanish technical specifications.

The percentage of additive required to obtain an adequate breaking time was then calculated. A long breaking time would cause a considerable delay in the acquisition of strength of the bituminous mixture and consequently a longer time for opening to traffic. Therefore, of the three families of asphalt mixes, the percentage of additive to be added was calculated to obtain a breaking time of 35 s and good initial cohesion.

Finally, to evaluate the friction of the mixture for the rapid opening of the pavement to traffic after the execution of the surface treatment, the test to determine the cohesion of the mixture was carried out

in accordance with standard UNE-EN 12274-4 [40]. This test consists of applying a load on a rubber rammer that rests on the surface treatment, then it is turned at different times and the necessary torque is measured. The main result of this test is the torque at 60 ± 1 min.

With all the results of the different families of bituminous mixtures manufactured, the best economic, technical, and environmental option was evaluated.

2.2.3. Optimal Combination of Materials

The results of the different families were evaluated in order to obtain the optimal combination of materials. This combination will be based on technical principles, since it is necessary that all the prescriptions established by the technical specifications are fulfilled. In turn, economically based criteria are essential to decide between families with acceptable results, since adding increasing percentages of bitumen emulsion to achieve similar results is not an adequate option. In addition, the use of a higher percentage of natural raw materials creates a sustainable mix but in a smaller proportion.

On the basis of detailed analyses, the best option was evaluated and tests were repeated to confirm those obtained previously.

3. Results and Discussions

3.1. Analysis of Electric Arc Furnace Slags

The materials analyzed in this section are electric arc furnace slags and silica sands. The electric arc furnace slag, being a waste from the steel industry, was analyzed chemically in order to better understand its physical and mechanical behavior.

For this purpose, the elemental analysis test was first performed to detect the percentages of carbon, nitrogen, hydrogen, and sulphur in the sample. The results of this test are shown in Table 3.

Table 3. Elemental analysis of electric arc furnace slag (EAFS).

Sample	Nitrogen, %	Carbon, %	Hydrogen, %	Sulphur, %
EAFS	0.005 ± 0.000	0.164 ± 0.003	0.04460 ± 0.001	0.000 ± 0.000

As can be seen the percentages of the chemical elements, carbon, nitrogen, hydrogen, and sulphur in the sample of electric arc furnace slag are very low. This fact is mainly due to the inorganic nature of the material. It can be seen that the percentage of carbon is low, reflecting the absence of organic matter or carbonates in the sample. On the other hand, it is worth noting the zero value of sulphur obtained. If otherwise there would have been an important percentage of this chemical element in the sample, it would imply a special care in the study, since the leachates produced should be evaluated and ensure that they are acceptable by the standard in this respect.

The X-ray fluorescence test was performed on the electric arc furnace slags in order to obtain the chemical composition. The results of this test are shown in Table 4.

The chemical composition of the electric arc furnace slag is derived directly from its formation process. High percentages of iron are to be expected since they come from steel, as well as high percentages of calcium oxide due to its addition in the steel process to obtain the final material. Silicon and aluminum oxides are common in the scrap used for the manufacture of new steels. In turn, magnesium, manganese, and chrome are common in the composition of steel. The other elements are found in such a small percentage that they cannot be extrapolated. The very low percentage of sulphur ensures that leachate from the slag does not represent an environmental problem, as is the case with other contaminating elements and is limited in leaching by the standards in this respect. It should be noted that the presence of oxides in the chemical composition of electric arc furnace slag does not imply an expansion of the material in contact with water. This fact is due to the fact that the production industry, after removing the slag from the furnace, waters it with abundant water to lower

its temperature and it is stored in the open air. Therefore, a carbonation process is produced that makes the geometric characteristics of the slag stable.

Table 4. X-ray fluorescence of electric arc furnace slag.

Composite	wt., %	Est. Error
CaO	31.75	0.23
Fe ₂ O ₃	21.96	0.21
SiO ₂	17.52	0.19
Al ₂ O ₃	12.26	0.16
MnO	6.15	0.12
MgO	5.05	0.11
Cr ₂ O ₃	2.73	0.08
TiO ₂	0.955	0.047
BaO	0.658	0.033
P ₂ O ₅	0.319	0.016
MrO	0.1860	0.0093
V ₂ O ₅	0.1590	0.0079
Nb ₂ O ₅	0.0659	0.0033
S	0.0645	0.0032
ZrO ₂	0.0551	0.0028
K ₂ O	0.0289	0.0016
CuO	0.0254	0.0017
ZnO	0.0245	0.0016
Co ₃ O ₄	0.0147	0.0016
Eu ₂ O ₃	0.0137	0.0065
WO ₃	0.0104	0.0031
Y ₂ O ₃	0.0018	0.0005

After analyzing the chemical composition of the electric arc furnace slag and evaluating its suitability for use in bituminous mixtures, the physical characteristics of the slag and the silica sand were studied. For this purpose, first the filler was studied and then the fine and coarse aggregate.

The tests carried out on the filler of both materials are the density of the particles, showing density values of $3076 \pm 77 \text{ kg/m}^3$ for the filler of the electric arc furnace slag and $2511 \pm 53 \text{ kg/m}^3$ for the filler of the silica sand. It can be clearly seen how the chemical composition of the slag conditions the higher density in relation to a conventional aggregate. In turn, it was performed in the apparent density test in kerosene showing values of $700 \pm 50 \text{ kg/m}^3$ and $600 \pm 50 \text{ kg/m}^3$ for the filler of the electric arc furnace slag and silica sand, respectively. Both values are acceptable and reflect a non-pulverulent behavior of the materials, ensuring a good mass dosage.

In addition, in fine aggregates, the test of sand equivalent in the electric arc furnace slag reflected a value of $85 \pm 2\%$ and the silica sand a value of $60 \pm 1\%$. Both values are acceptable by the technical specifications; however, it is remarkable the high value of the slag reflecting the low percentage of colloidal particles, and consequently, the cleanliness of the aggregate so that there are no subsequent problems of adhesion with the bituminous emulsion.

The coarse aggregate of the electric arc furnace slag was evaluated with the physical tests of percentage of crushed surfaces, with a result of $100 \pm 0\%$, and flakiness index, with a result of $0 \pm 0\%$. The achievement of these excellent results for the electric arc furnace slag derives directly from its formation process. The gasification in the electric furnace of all the impurities makes it possible that after their removal and cooling, the particles acquire irregular shapes, with dimensions in the three axes similar and without the need for crushing. It is therefore an essential characteristic that makes the slag a very suitable aggregate for the formation of asphalt mixtures, even in very important traffic.

The mechanical characteristics of the coarse aggregate of the electric arc furnace slag were evaluated with the tests of resistance to fragmentation (standard UNE-EN 1097-2) [35], resistance to frost-thaw cycles (standard UNE-EN 1367-1) [36], and determination of the polished stone value

(standard UNE-EN 1097-8) [37]. Fragmentation resistance of the electric arc furnace slag reflected a value of $13 \pm 1\%$. This value shows a very good mechanical resistance of the slags to fragmentation, similar values being achieved only in natural aggregates of high quality and economic cost. In addition, the resistance to the frost–thaw cycles of the slag of electric arc furnace steel is $0.551 \pm 1\%$. This means that the loss of mass after a series of freezing and thawing cycles was negligible, again reflecting the excellent characteristics of the electric arc furnace slag. Finally, the determination of the polished stone value for the electric arc furnace slag showed a value of 58 ± 1 . The result of this test reflects the high friction resistance of the slag, which can even be used for very high-traffic roads [16].

All chemical, physical, and mechanical characteristics of the electric arc furnace slag and silica sand have been evaluated and the suitability of both materials has been demonstrated. The particle density of the entire grading curve of the slag and sand was calculated. These results reflected $3351 \pm 69 \text{ kg/m}^3$ for the electric arc furnace slag and $2498 \pm 50 \text{ kg/m}^3$ for the silica sand, again reflecting the high density of the slag due to its metallic chemical composition.

3.2. Conformation of the Bituminous Mix and Testing

In order to form the different bituminous mixtures with electric arc furnace slag and silica sand, it is first necessary to obtain the grading curve of both materials. It should be noted that the materials in this work are used as they are in the factory, so their grading is analyzed and not made in the laboratory. This is due to the direct use of this work in pavements without having to modify the grading of the slag and creating processes with a higher economic cost. Firstly, the particle size distribution of the electric arc furnace slag was analyzed (Figure 1). The grading curve of the electric arc furnace slag belongs to a discontinuous grading, there being mainly coarse aggregate and to a lesser extent fine aggregate. Since the maximum particle size is 16 mm and the surface treatment developed is a maximum particle size of 8 mm, sizes larger than 8 mm should be discarded without altering the lower ones. This process is fast and economical if done in the factory, so it does not imply a major problem. Based on this, the grading of the electric arc furnace slag with maximum aggregate size of 8 mm will be used and is represented in Figure 1.

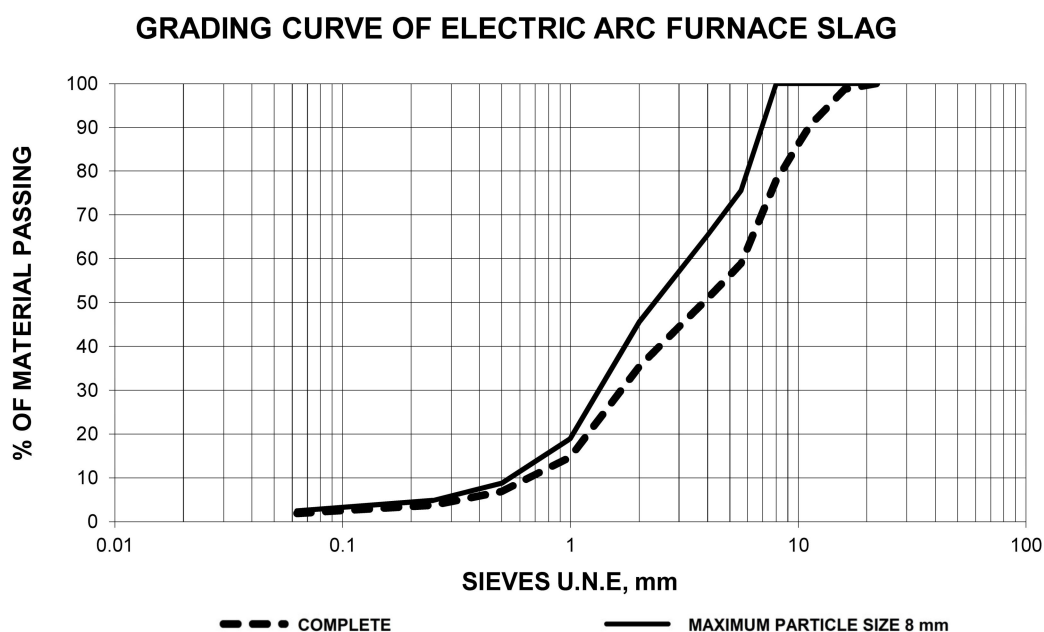


Figure 1. Grading curve of electric arc furnace slag.

On the other hand, the grading of the silica sand was studied with the same sieves and represented in Figure 2.

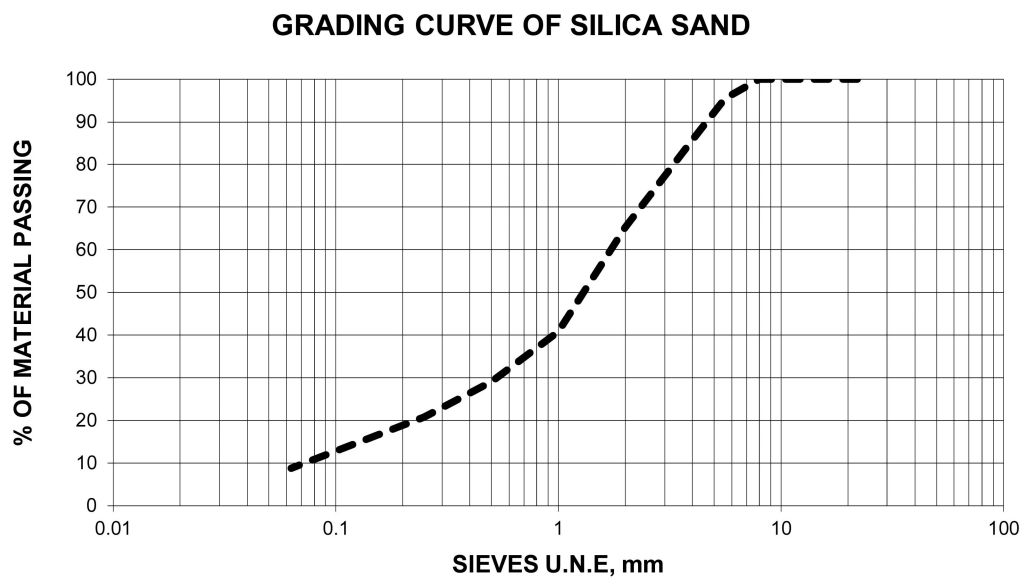


Figure 2. Grading curve of the silica sand.

It can be seen that the grading curve of the sand coincides with a continuous grading. This material will correct the grading of the electric arc furnace slag by providing it with the fine aggregate needed for the asphalt mix. In this way, the slag provides the adequate friction of the surface treatment and the sand, together with the bitumen, is in charge of providing the necessary mastic for the tensile strength and the coating of the electric furnace slag. This is the main reason for the incorporation of the silica sand, as it is more economical to incorporate it than to distribute the slag into different particle sizes distribution.

Since the Spanish standard fixes the grading envelope of this type of surface treatment with a maximum size of aggregates of 8 mm, the grading curve of the electric arc furnace slag and silica sand must be adjusted to the defined grading envelope. The grading curve of the mass mixture of 33.3% electric furnace slag and 66.6% silica sand is represented together with the grading envelope defined in Figure 3 and Table 5.

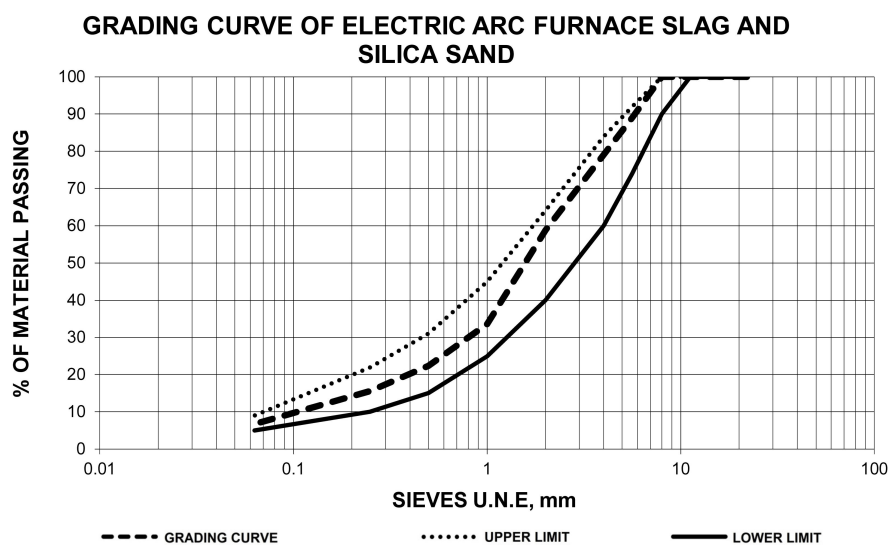


Figure 3. Grading curve obtained by the combination of 33.3% of electric arc furnace slag and 66.6% of silica sand.

Table 5. Grading curve of electric arc furnace slag, of silica sand, and of the combination of both materials.

Sieves UNE	22.00	16.00	11.20	8.00	5.60	4.00	2.00	1.00	0.50	0.25	0.06
EAFS	100	98.70	90.40	77.90	58.90	51.00	35.50	14.70	6.90	3.80	1.90
EAFS < 8 mm	100	100	100	100	75.60	65.50	45.60	18.90	8.80	4.90	2.50
Silica sand	100	100	100	100	95.50	85.70	65.30	40.80	29.10	20.80	8.80
Combination	100	100	100	100	88.93	79.03	58.80	33.57	22.40	15.55	6.72
Upper limit	100	100	100	100	92.00	84.00	64.00	45.00	31.00	22.00	9.00
Lower limit	100	100	100	90.00	74.00	60.00	40.00	25.00	15.00	10.00	5.00

These combination percentages have been selected by the appropriate grading curve obtained in relation to the grading envelope prescribed by the standard. It can be seen that it practically coincides with the intermediate grading curve of the grading envelope, so it is very suitable for use.

Once the percentage of combination of slag and sand was determined, the compatibility of the aggregates with the emulsion was studied, as well as the percentages of emulsion and water required. It should be noted that from now on, when referring to aggregate, it refers to electric arc furnace slag at 33.3% and silica sand at 66.6%. Therefore, all percentages of bitumen, bitumen emulsion, and water will refer to the aggregate obtained by the combination of both materials.

The compatibility of the bitumen emulsion with the aggregates was determined through the coating test. The coating test, detailed in the methodology, was carried out with a percentage of mixing water of 12.5%. This percentage of water corresponds to the pre-coating water and the water of the emulsion. The percentage of bitumen will be the intermediate of the interval fixed by the standard, therefore, 7%. This percentage will correspond to a percentage of emulsion of 11.7% and, in short, a percentage of pre-coating water of 7.8%. All the materials were mixed with these prescriptions in dry conditions and with water. The images of the coating test are shown in Figure 4.

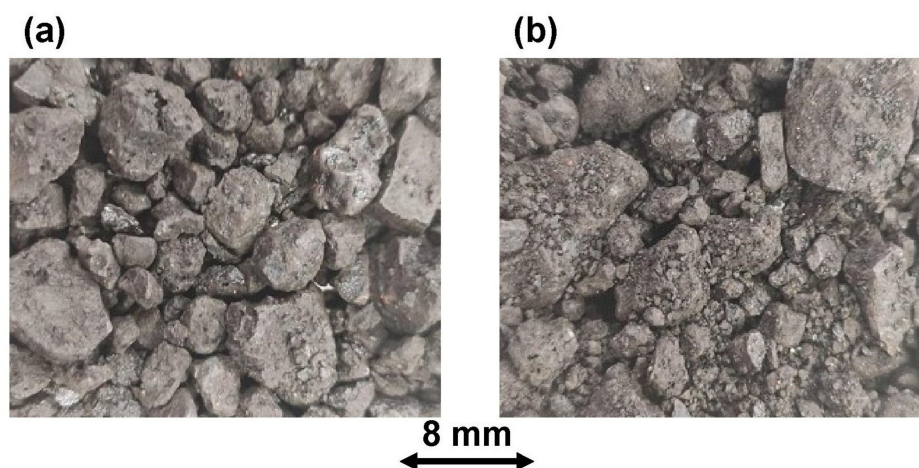


Figure 4. Coating test with the pre-coating water and the bitumen emulsion C60B4 MIC. (a) Coating test. (b) Coating test after washing in water.

Figure 4 shows that the adhesion of the bitumen emulsion in dry conditions and with water is very good. The aggregate (electric arc furnace slag and silica sand) is completely covered by the emulsion and does not come off after mixing with water. Therefore, it can be concluded that the C60B4 MIC emulsion is suitable for use with this type of aggregate.

Once the compatibility of the emulsion with the aggregate was determined, different specimens of each family were conformed with the percentages of emulsion and water set in Table 2, and the grading detailed in Figure 3. Subsequently, the test to determine wearing in water was carried out on the different samples of each family, according to the procedure detailed in the methodology. The results of the wearing test are shown in Figure 5.

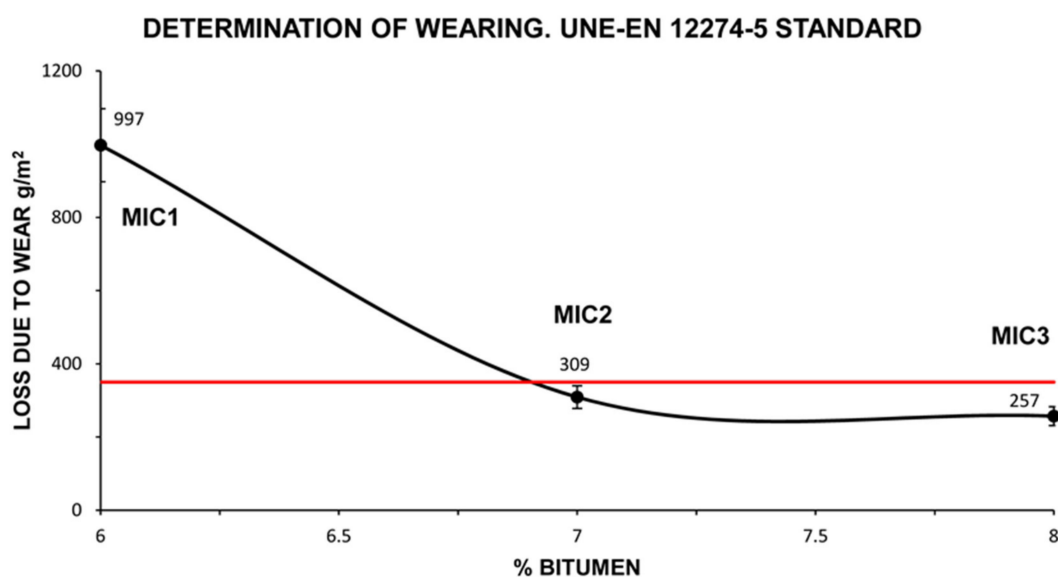


Figure 5. Determination of the wearing pattern of different families of bituminous mixtures according to the percentage of bitumen (standard UNE-EN 12274-5 [39]). The red line represents the minimum value accepted by the corresponding regulation.

The water wearing test of the different families shows a decrease in mass loss with an increase in the percentage of bituminous emulsion. This is to be expected, since a higher percentage of emulsion implies a higher percentage of bitumen, and thus a more complete coating of the slag that prevents its raveling. The MIC2 and MIC3 families obtain acceptable results, since the Spanish standard limits the maximum wearing value to 350 g/m² for important traffic.

At the same time, it is essential that the breaking times are adapted to the working timing of the manufacture and extension of the asphalt mixture. For this purpose, 35 s was taken as the appropriate breaking time. The choice of this time is because it is usual in the working world in the formation of this type of surface treatment. However, depending on the climatic conditions, the pace of construction, and various factors, the breaking time can be modified with the addition of the additive for this purpose. The additive described in materials will be incorporated into the different families of bituminous mixtures until a breaking time of 35 s is obtained in all of them. The percentages of additive for each family of samples to obtain the stipulated breaking time are shown in Figure 6.

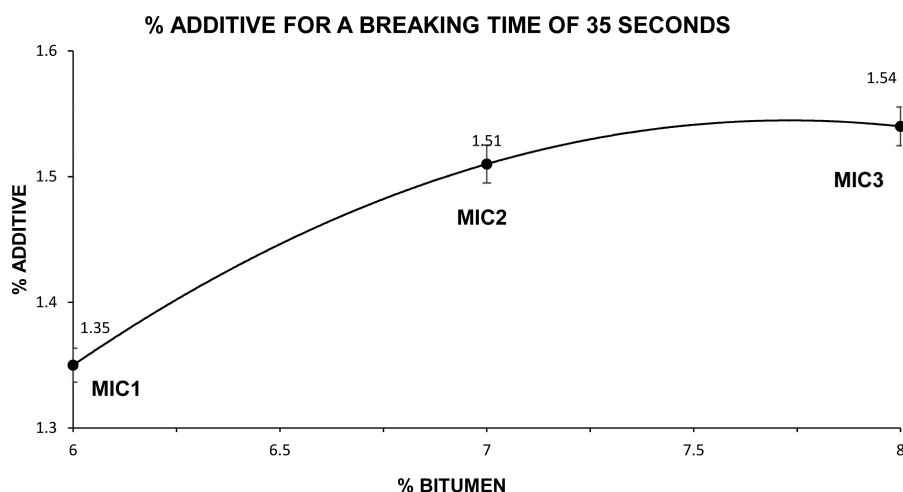


Figure 6. Percentage of additive needed in each family to obtain a 35-s breaking time of the emulsion.

Figure 6 shows how a higher percentage of emulsion requires a higher percentage of additive, but the variations are minimal. This fact is mainly due to the lower percentage of emulsion for the coating of the aggregates, so their absorption is higher and their breaking time is shorter. However, variations are minimal.

Finally, the cohesion test determined the resistance offered by the surface treatment to the tangential stresses applied. This is directly related to the good friction of the treatment to the lower layer, as well as to the time required for opening the pavement to traffic after the execution of the treatment. The results of the cohesion test for the different families of bituminous mixtures are detailed in Figure 7.

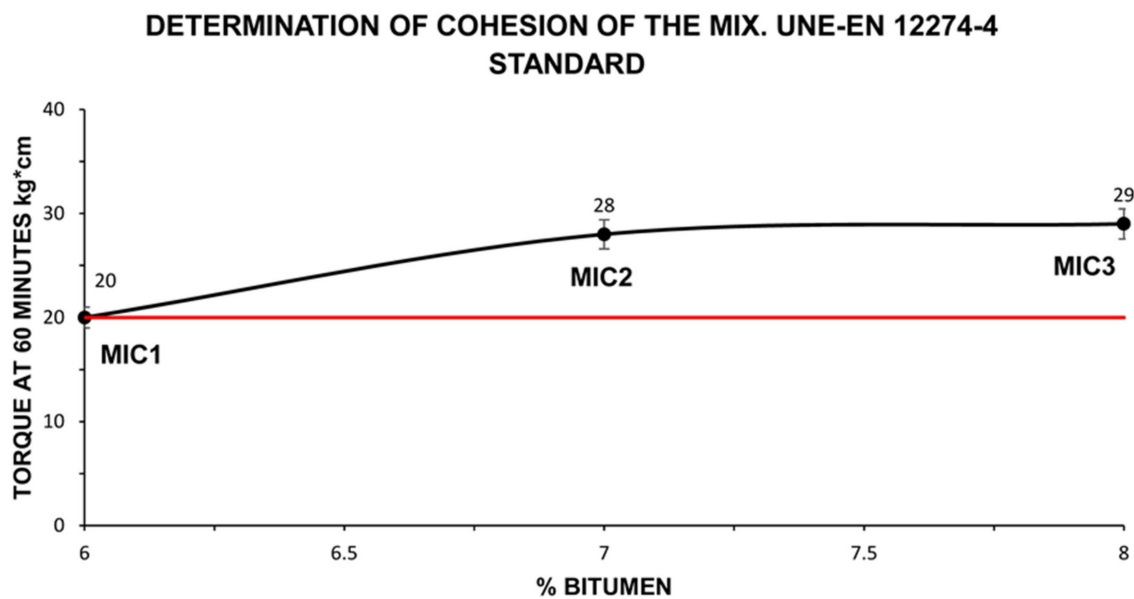


Figure 7. Determination of the cohesion of the different families of bituminous mixtures according to the percentage of bitumen (standard UNE-EN 12274-4 [40]). The red line represents the minimum value accepted by the corresponding regulation.

The results show a similarity between the MIC2 and MIC3 families of bituminous mixtures, and a much lower value for the MIC1 family. The standard for this is that the minimum torque for important traffic is 20 kg·cm, therefore all values are acceptable. However, the value of the MIC1 family is at the limit for acceptance, so its use may be inadvisable.

3.3. Optimal Combination of Materials

Based on the results of the different tests on the three sample families, in this section, the family that provides acceptable technical results and at the same time has the lowest economic and environmental cost will be selected.

The MIC1 family with a bitumen percentage of 6% showed negative results in the wet abrasion test. This test is essential for the correct functioning of the surface treatment, as it reflects its behavior in the pavement. Therefore, the family called MIC1 has been discarded for use.

On the other hand, the MIC2 and MIC3 families present acceptable and similar results in the various tests. Moreover, these results are acceptable according to the current standards, not only for intermediate traffic but also for important traffic [16]. The physical and mechanical characteristics of the furnace electric slag show the suitability of its use in surface treatments.

Within the choice between the two families, it should be noted that the MIC2 family obtains acceptable results with a bitumen percentage lower by one percent, therefore more respectful of quality and sustainability levels, since with the use of a lower proportion of raw materials, it achieves similar

and acceptable results. Therefore, this optimum combination of materials was proposed as the ideal one for use in high-friction surface treatments in pavements with important traffic and electric arc furnace slag.

The samples were re-conformed and the tests on this family were redone. The results of the different tests are shown in Table 6.

Table 6. Results of tests of bituminous mixture with electric arc furnace slag and the optimal combination of materials.

MIC2	Value
Aggregate	33.3% EAFS + 66.6% silica sand
% bitumen	7
% bitumen emulsion	11.7
% precoating water	7.8
% additive	1.5
Determination of wearing, g/m ²	301 ± 9
Breaking time, s	35 ± 0
Determination of cohesion, kg-cm	29 ± 1

4. Conclusions

The results of the different tests carried out in the methodology show a series of partial conclusions that converge in the final conclusion on the use of electric arc furnace slag in pavement surface treatments. The importance of the use of industrial waste in activities within the construction sector should be highlighted for different reasons; on the one hand, the extraction of virgin materials is reduced, with the consequent reductions in environmental impact and greenhouse gas emissions; on the other hand, the deposition of this waste in landfills is avoided; and finally, exceptional characteristics are achieved for the planned purpose without the use of high quality and costly commercial materials. The partial conclusions obtained from this study are presented below.

- The electric arc furnace slag is mainly conformed by coarse aggregate and to a lesser extent by fine aggregation. They contain a low proportion of colloidal particles.
- The chemical composition of the electric arc furnace slag is adequate. There are no high percentages of pollutants that could cause environmental problems, or other elements that could damage the manufacture of bituminous mixtures.
- The shape of the different particles of the electric furnace slag are suitable for use in surface treatments for friction, as they have a high microtexture and a very irregular surface. This fact, together with the excellent resistance to fragmentation and frost–thaw cycles, makes the electric arc furnace slag an ideal aggregate for use in high-friction surface treatments and in important traffic.
- The density of electric arc furnace slag is higher than that of a conventional aggregate, so while this is not a problem, it must be taken into account in the manufacturing and transportation process.
- In the different families of test specimens made up of electric arc furnace slag and silica sand, it was observed that the increase in the percentage of emulsion caused greater resistance to wear of the asphalt mixture, obtaining acceptable values from 7% bitumen.
- The cohesion of the bituminous mix increases as the percentage of emulsion increases, with all families reflecting adequate cohesion from 6% emulsion to 8%. This fact results in a better adhesion of the treatment to the surface layer of the pavement where it is applied and a good reaction to traffic loads.
- The family selected as optimal has a grading formed by 33.3% of slag of electric arc furnace screened by the sieve 8 mm and 66.6% of silica sand. The percentages of bituminous emulsion are 11.7% and 7.8% of precoating water. In turn, the additive was added at 1.5% to achieve adequate breaking times.

- The tests carried out show the technical feasibility of this surface treatment for its execution. The excellent results obtained imply adequate friction characteristics of the pavement. In turn, the execution of this research does not imply important changes in comparison with traditional surface treatments, so that only the usual care should be taken for the execution of this technique.

Based on the detailed conclusions, it can be stated that it is possible to carry out surface, waterproofing, and high-friction treatments with bituminous emulsion and electric arc furnace slag. This will create, therefore, a sustainable bituminous mixture with adequate physical and mechanical characteristics, with a lower environmental impact thanks to the use of waste and the conformation at ambient temperature of the mixture by the use of the emulsion.

Author Contributions: Conceptualization, F.A.C.-I., F.J.I.-G., J.M.T.-S., and J.S.-M.; methodology, F.A.C.-I., F.J.I.-G., J.M.T.-S., and J.S.-M.; software, J.M.T.-S. and J.S.-M.; validation, F.A.C.-I. and F.J.I.-G.; formal analysis, F.A.C.-I. and F.J.I.-G.; investigation, J.M.T.-S. and J.S.-M.; resources, F.A.C.-I.; data curation, F.J.I.-G.; writing—original draft preparation, J.S.-M.; writing—review and editing, J.M.T.-S.; visualization, J.M.T.-S.; supervision, F.A.C.-I.; project administration, J.S.-M.; funding acquisition, F.A.C.-I. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Acknowledgments: Technical and human support provided by CICT of Universidad de Jaén (UJA, MINECO, Junta de Andalucía, FEDER) is gratefully acknowledged.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Mao, X.; Wang, J.; Yuan, C.; Yu, W.; Gan, J. A Dynamic traffic assignment model for the sustainability of pavement performance. *Sustainability* **2018**, *11*, 170. [CrossRef]
2. Zhang, H.; Hu, Z.; Hou, S.; Xu, T. Aging behaviors of bitumen degraded by the microbial consortium on bituminous pavement. *Constr. Build. Mater.* **2020**, *254*, 119333. [CrossRef]
3. Loprencipe, G.; Pantuso, A.; Di Mascio, P. Sustainable pavement management system in urban areas considering the vehicle operating costs. *Sustainability* **2017**, *9*, 453. [CrossRef]
4. Yuhong Wang, P.E.; Wen, Y.; Zhao, K.; Chong, D.; Wong, A.S.T. Evolution and locational variation of asphalt binder aging in long-life hot-mix asphalt pavements. *Constr. Build. Mater.* **2014**, *68*, 172–182. [CrossRef]
5. Pranjić, I.; Deluka-Tibljaš, A.; Cuculić, M.; Šurdonja, S. Influence of pavement surface macrotexture on pavement skid resistance. *Transp. Res. Procedia* **2020**, *45*, 747–754. [CrossRef]
6. Tsubota, T.; Fernando, C.; Yoshii, T.; Shirayanagi, H. Effect of road pavement types and ages on traffic accident risks. *Transp. Res. Procedia* **2018**, *34*, 211–218. [CrossRef]
7. Bołtryk, M.; Falkowski, K.; Pawluczuk, E. A report on the fabrication of concrete pavement with the application of anionic bitumen emulsion. *Constr. Build. Mater.* **2017**, *154*, 1004–1014. [CrossRef]
8. Wang, H.; Wang, Z. Evaluation of pavement surface friction subject to various pavement preservation treatments. *Constr. Build. Mater.* **2013**, *48*, 194–202. [CrossRef]
9. Li, B.; Zhang, C.; Xiao, P.; Wu, Z. Evaluation of coarse aggregate morphological characteristics affecting performance of heavy-duty asphalt pavements. *Constr. Build. Mater.* **2019**, *225*, 170–181. [CrossRef]
10. Zheng, X.; Easa, S.M.; Ji, T.; Jiang, Z. Incorporating uncertainty into life-cycle sustainability assessment of pavement alternatives. *J. Clean. Prod.* **2020**, *264*, 121466. [CrossRef]
11. Jin, R.; Li, B.; Zhou, T.; Wanatowski, D.; Piroozfar, P. An empirical study of perceptions towards construction and demolition waste recycling and reuse in China. *Resour. Conserv. Recycl.* **2017**, *126*, 86–98. [CrossRef]
12. Menaria, Y.; Sankhla, R. Use of Waste Plastic in Flexible Pavements-Green Roads. *Open J. Civ. Eng.* **2015**, *5*, 299–311. [CrossRef]
13. Plati, C. Sustainability factors in pavement materials, design, and preservation strategies: A literature review. *Constr. Build. Mater.* **2019**, *211*, 539–555. [CrossRef]
14. Escorias de Acería de Horno de Arco Eléctrico | CEDEX. Available online: <http://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/25/escorias-de-aceria-de-horno-de-arco-electrico/> (accessed on 29 April 2020).

15. Amin, M.; Khan, K.; Saleem, M.; Khurram, N.; Niazi, M. Influence of mechanically activated electric arc furnace slag on compressive strength of mortars incorporating curing moisture and temperature effects. *Sustainability* **2017**, *9*, 1178. [[CrossRef](#)]
16. BOE.es—Documento BOE-A-2015-48. Available online: <https://www.boe.es/eli/es/o/2014/12/12/fom2523> (accessed on 16 September 2020).
17. UNE-EN 13808:2013 Bitumen and Bituminous Binders—Framework for Specifying Cationic Bituminous Emulsions. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0052291> (accessed on 29 September 2020).
18. UNE-EN 1430:2009 Bitumen and Bituminous Binders—Determination of Particle Polarity of Bituminous Emulsions. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0044069> (accessed on 29 September 2020).
19. UNE-EN 13075-1:2017 Bitumen and Bituminous Binders—Determination of Breaking Behaviour—Part 1: Determination of Breaking Value of Cationic Bituminous Emulsions, Mineral Filler Method. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0057840> (accessed on 29 September 2020).
20. UNE-EN 12846-1:2011 Bitumen and Bituminous Binders—Determination of Efflux Time by the Efflux Viscometer—Part 1: Bituminous Emulsions. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0047377> (accessed on 29 September 2020).
21. UNE-EN 1428:2012 Bitumen and Bituminous Binders—Determination of Water Content in Bituminous Emulsions—Azeotropic Distillation Method. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0049266> (accessed on 29 September 2020).
22. UNE-EN 1429:2013 Bitumen and Bituminous Binders—Determination of Residue on Sieving of Bituminous Emulsions, and Determination of Storage Stability by Sieving. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0052189> (accessed on 29 September 2020).
23. UNE-EN 12847:2009 Bitumen and Bituminous Binders—Determination of Settling Tendency of Bituminous Emulsions. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0044066> (accessed on 29 September 2020).
24. UNE-EN 13614:2011 Bitumen and Bituminous Binders—Determination of Adhesivity of Bituminous Emulsions by Water Immersion Test. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0048094> (accessed on 29 September 2020).
25. UNE-EN 1431:2018 Bitumen and Bituminous Binders—Determination of Residual Binder and Oil Distillate from Bitumen Emulsions by Distillation. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0060676> (accessed on 29 September 2020).
26. UNE-EN 1426:2015 Bitumen and Bituminous Binders—Determination of Needle Penetration. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0055820> (accessed on 29 September 2020).
27. UNE-EN 1427:2015 Bitumen and Bituminous Binders—Determination of the Softening Point—Ring and Ball Method. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0055821> (accessed on 29 September 2020).
28. UNE-EN 13074-1:2019 Bitumen and Bituminous Binders—Recovery of Binder from Bituminous Emulsion or Cut-Back or Fluxed Bituminous Binders—Part 1: Recovery by Evaporation. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0062153> (accessed on 29 September 2020).
29. UNE-EN 13074-2:2011 Bitumen and Bituminous Binders—Recovery of Binder from Bituminous Emulsion or Cut-Back or Fluxed Bituminous Binders—Part 2: Stabilisation after Recovery by Evaporation. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0047380> (accessed on 29 September 2020).
30. UNE-EN 1097-7:2009 Tests for Mechanical and Physical Properties of Aggregates—Part 3: Determination of Loose Bulk Density and Voids. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0042553> (accessed on 16 September 2020).
31. UNE-EN 1097-3:1999 Tests for Mechanical and Physical Properties of Aggregates—Part 3: Determination of Loose Bulk Density and Voids. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0009465> (accessed on 16 September 2020).





32. UNE-EN 933-8:2012+A1:2015/1M:2016 Tests for Geometrical Properties of Aggregates—Part 8: Assessment of fines—Sand Equivalent Test. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0056257> (accessed on 16 September 2020).
33. UNE-EN 933-5:1999/A1:2005 Tests for Geometrical Properties of Aggregates—Part 5: Determination of Percentage of Crushed and Broken Surfaces in Coarse Aggregate Particles. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0034842> (accessed on 16 September 2020).
34. UNE-EN 933-3:2012 Tests for Geometrical Properties of Aggregates—Part 3: Determination of Particle Shape—Flakiness Index. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0049063> (accessed on 16 September 2020).
35. UNE-EN 1097-2:2010 Tests for Mechanical and Physical Properties of Aggregates—Part 2: Methods for the Determination of Resistance to Fragmentation. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0046026> (accessed on 16 September 2020).
36. UNE-EN 1367-1:2008 Tests for Thermal and Weathering Properties of Aggregates—Part 1: Determination of Resistance to Freezing and Thawing. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0040756> (accessed on 16 September 2020).
37. UNE-EN 1097-8:2010 Tests for Mechanical and Physical Properties of Aggregates—Part 8: Determination of the Polished Stone Value. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0044542> (accessed on 20 September 2020).
38. NLT-196/84 Envuelta y resistencia al desplazamiento por el agua de las emulsiones bituminosas—Normativa de carreteras. Available online: <http://normativadecarreteras.com/listing/nlt-19684-envuelta-resistencia-al-desplazamiento-agua-las-emulsiones-bituminosas/> (accessed on 29 September 2020).
39. UNE-EN 12274-5:2020 Slurry Surfacing—Test Method—Part 5: Determination of the Minimum Binder Content and Wearing Resistance. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0063707> (accessed on 16 September 2020).
40. UNE-EN 12274-4:2003 Slurry Surfacing—Test Methods—Part 4: Determination of Cohesion of the Mix. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0029768> (accessed on 16 September 2020).



© 2020 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Article

Evaluation of the Use of Electric Arc Furnace Slag and Ladle Furnace Slag in Stone Mastic Asphalt Mixes with Discarded Cellulose Fibers from the Papermaking Industry

Juan María Terrones-Saeta * , Jorge Suárez-Macías , Francisco Javier Iglesias-Godino  and Francisco Antonio Corpas-Iglesias 

Department of Chemical, Environmental, and Materials Engineering, Higher Polytechnic School of Linares, University of Jaen, Scientific and Technological Campus of Linares, Linares, 23700 Jaen, Spain; jsuarez@ujaen.es (J.S.-M.); figodino@ujaen.es (F.J.I.-G.); facorpas@ujaen.es (F.A.C.-I.)

* Correspondence: terrones@ujaen.es; Tel.: +34-675-201-939

Received: 1 November 2020; Accepted: 19 November 2020; Published: 21 November 2020



Abstract: The construction sector is one of the most demanding of raw materials that exist at present. In turn, the greenhouse gas emissions that it produces are important. Therefore, at present there are several lines of research in which industrial by-products are incorporated for the manufacture of bituminous mixtures and the reduction of CO₂ emissions, framed inside the circular economy. On the base of the aforementioned, in this research, bituminous mixtures of the Stone Mastic Asphalt type were developed with electric arc furnace slag, ladle furnace slag and discarded cellulose fibers from the papermaking industry. To this end, the waste is first characterized physically and chemically, and its properties evaluated for use in bituminous mixtures. Later, different groups of samples are conformed with conventional materials and with the waste in order to be able to compare the physical and mechanical properties of the obtained bituminous mixtures. The physical tests carried out were bulk density, maximum density and void index, as well as the Marshall test for the evaluation of the strength and plastic deformations of all the bituminous mixtures manufactured. The study and evaluation of the results showed that the incorporation of slag makes it possible to absorb a greater percentage of bitumen and obtain better mechanical properties, while maintaining a similar deformation and void content. Therefore, it is feasible to use the mentioned slags to create sustainable, resistant and suitable pavements for important traffic.

Keywords: pavement; bituminous mixtures; electric arc furnace slag; ladle furnace slag; cellulose fibers; stone mastic asphalt; sustainability; steel; circular economy

1. Introduction

Road construction is an essential activity for the economic development of a nation and the enhancement of social welfare. Moreover, road transport accounts in different countries for a high percentage of total goods transport, being essential for short and medium distance communication. Therefore, the construction of higher quality and with greater safety roads for vehicles is an unquestionable fact [1,2]. However, this type of infrastructure affects the environment throughout its life cycle assessment [3].

The environmental impact produced by the construction of roads begins with their laying out, altering the landscape. Subsequently, for construction a series of materials are required in significant quantities which are mainly extracted from nearby quarries. In turn, during the manufacture of bituminous mixtures creates CO₂ emissions and fossil fuels are consumed. Transport equipment,

extension of the bituminous mixture and compaction also represent an important source of greenhouse gas emissions. Once the infrastructure has been executed, the conservation and maintenance work [4], as well as the continuous flow of vehicles, implies a significant effect on the environment during their working life. At the end of their working life [5], the aged materials are removed and dumped in landfills in most cases, without taking advantage of the usefulness they still offer [6].

According to the scheme detailed above, corresponding to the so-called Linear Economy, significant greenhouse gas emissions are produced throughout the life cycle assessment of the road. Consequently, and in line with the new Circular Economy [7], these emissions must be reduced with different methods [8]. Among these different forms of reducing environmental impact is the use of industrial by-products as raw materials [9]. In this way, the extraction of natural materials is reduced, with the consequent decrease in gas emissions, and the deposition of industrial waste in landfills is avoided [10]. Furthermore, the use of the techniques of manufacturing bituminous mixtures more sustainable with the environment and with a much more optimized processes it also offers a significant reduction in environmental impact. In turn, the development of sustainable materials with industrial by-products, with a longer working life and with a higher quality, also creates the reduction of greenhouse gas emissions [11,12]. Finally, the use of aged materials for the manufacture of new materials avoids the dumping of waste in landfills and reduces the extraction of new raw materials. In this manner, the environmental impact is significantly reduced and the flow of materials is closed [13].

In line with the comments above, various investigations have been carried out in which waste has been incorporated for the manufacture of bituminous mixtures and as a substitute for traditional aggregates. Among these wastes are recycled concrete waste [14], copper slag [15], ceramic and brick dust [16], polymer waste [17], recycled glass [18], recovered asphalt pavement [19] and crumb tire rubber [20], among others.

The use of waste is therefore a good option within the Circular Economy that tries to obtain final products of similar quality. However, in this research, Stone Mastic Asphalt (SMA) type bituminous mixtures are developed with electric arc furnace slags and ladle furnace slags in order to improve the properties of the final mixture with respect to those made with virgin materials [21]. This is made possible by optimizing the strength characteristics of the electric arc furnace slag and the cementitious qualities of the ladle furnace slag. Furthermore, the use of industrial by-products derived from the steel of the siderurgical industry allows it to be considered a sustainable material.

Stone Mastic Asphalt (SMA) bituminous mixtures have a discontinuous grading. This discontinuous grading gives them greater resistance to plastic strains, a better surface texture, greater friction of the tire with the pavement [22], greater permeability to evacuate rainwater, and even greater absorption of noise caused by the contact of the tire with the pavement. At the same time, the incorporation of a higher percentage of bitumen compared to other types of discontinuous grading bituminous mixtures, gives it greater resistance to repetitive traction loads and consequently a longer working life [23,24]. This higher percentage of bitumen is achieved by the addition of fibers. These fibers absorb the excess bitumen and prevent it from bleeding out during the working life of the pavement. Therefore, Stone Mastic Asphalt has a high quality and the resistance suitable for use on roads with important traffic during their working lives.

However, the discontinuous grading of the detailed mixture, as well as the required quality, make the use of high-strength aggregates necessary. Aggregates of higher quality and mechanical resistance mainly correspond to siliceous rocks that are difficult to extract and process, producing important CO₂ gas emissions in their extraction and continuous wear of the equipment during processing [25]. Therefore, the use of high resistance electric arc furnace slags, with excellent shape and reduced price [26], means an important reduction of the environmental impact [27]. In addition, the coating of the electric arc furnace slag with bitumen, reduces in most cases, the possible leaching of contaminating elements that it may contain.

The electric arc furnace slag has been used in road infrastructures as an aggregate in concrete pavements [28,29], demonstrating good mechanical behavior of the resulting material. They have also

been used as substitutes for natural aggregate in different percentages in hot mix asphalts, showing excellent results in terms of workability, rigidity and fatigue resistance [30,31]. At the same time, warm mix asphalt has been developed with electric arc furnace slag [32,33], reflecting the improvement in the mechanical properties of the bituminous mixes manufactured [34]. Stone mastic asphalt mixtures have even been made with partial replacement of the aggregate with electric arc furnace slag [35], demonstrating that bituminous mixtures with slag were more resistant to cracking at low temperatures than those that incorporated natural aggregate.

In turn, siliceous aggregates have less adhesion with the bitumen than calcareous aggregates, mainly due to their chemical composition and compatibility between materials. Therefore, to execute a correct mastic that coats the aggregates, that supports the traction loads during the working life and avoids the bleeding of bitumen, calcareous filler or cement is usually used. Cement is one of the materials which provides greater resistance to mixing; however, its manufacturing is a process with a significant environmental impact, as it is a high source of greenhouse gas emissions. To solve this fact, in this research, ladle furnace slag was used as a filler. Ladle furnace slags have been studied in different investigations as additives to cement [36–38] or even for soil stabilization [39], showing very interesting cementitious properties [40,41]. Nevertheless, very few investigations have been carried out in which ladle furnace slag is used as a filler in bituminous mixtures [39] and even fewer in mixtures of such high quality as Stone Mastic Asphalt.

On the other hand, for bituminous mixture containing a higher percentage of bitumen to have adequate resistance to repeated traction loads and that no bitumen bleeding occurs, cellulose fibers must be incorporated. These cellulose fibers, introduced in a low percentage into the bituminous mix, are capable of retaining the bitumen in the mix and forming a quality mastic in conjunction with the bitumen and filler. Specially treated commercial fibers are usually used for this purpose; however, in this research and with the aim of making a sustainable mix, cellulose fibers that have been discarded by the papermaking industry were incorporated. These cellulose fibers discarded by the papermaking industry have no current use, so in most cases they are deposited in landfills.

In conclusion, this research develops a quality hot mix asphalt, Stone Mastic Asphalt type, for roads with important traffic with electric arc furnace slag as a coarse and fine aggregate, with ladle furnace slag as a filler and with discarded cellulose fibers from the papermaking industry as an additive. For this purpose, the waste was initially characterized and its properties compared with conventional materials. Subsequently, different families of samples were conformed by increasing percentages of bitumen and the physical properties and Marshall Stability of the mixtures obtained were evaluated. Finally, an optimal material combination was obtained for the asphalt mixtures developed, and the advantages of using the waste over virgin materials were compared.

The tests carried out, as well as their quality limits, will be governed by Spanish regulations, which in turn coincide with European regulations. This Spanish regulation corresponds to the Circular Order OC 3/2019 [42] and was selected because of the profusion of these techniques that have reached the Spanish territory, there existing an infinity of success cases. However, the comparison of the results obtained in bituminous mixtures with waste and bituminous mixtures with traditional materials, objectively reflects the quality of the incorporation of the by-products, and the results can easily be extrapolated to other international regulations.

The results showed that the incorporation of electric arc furnace slag, ladle furnace slag and cellulose fibers created an SMA mix with a higher percentage of bitumen and better mechanical performance, compared to the use of traditional aggregates and fillers.

2. Materials and Methods

This section describes the materials used for the development of the research, as well as the scientific methodology followed to reach the final conclusions. The final objective is the study of the benefits of incorporating the waste mentioned for the manufacture of SMA-type bituminous mixtures.

2.1. Materials

The materials used in this project are mainly waste and commercial materials. These materials are detailed in Section 2.1, defining their origin, production process and particular characteristics, making possible the reproduction of the present tests.

It should be noted that the industrial waste from this research (electric arc furnace slag (EAFS), ladle furnace slag (LFS) and cellulose fibers) was supplied by the producing company in an unaltered form. The process that has been carried out on these wastes is detailed in the following sections.

In turn, it should also be mentioned that the tests carried out have been executed for different production batches of the waste. In this way it has been confirmed that the physical and chemical properties of the waste are maintained over time. This fact is essential, since if the characteristics of the waste were to be modified to a large extent it would make their use in the construction of road infrastructure unfeasible, since large quantities of materials are consumed and could lead to changes in the final characteristics of the bituminous mixtures. It can therefore be stated that the waste studied maintains its physical and chemical properties over time, unlike other wastes such as sewage sludge, cutting sludge, etc.

Finally, it should be mentioned that the ladle furnace slag, electric arc furnace slag, cellulose fibers, as well as the hornfels aggregates and calcareous filler, were dried at a temperature of 105 ± 2 °C for 24 h in order to eliminate the humidity in them. The elimination of the humidity from the materials is intended to avoid introducing more variables into the methodology and to provide objective results. In the subsequent manufacturing process in industry, this humidity of the materials should simply be taken into account in order to take the appropriate corrections, if it was necessary.

2.1.1. Electric Arc Furnace Slag (EAFS)

The electric arc furnace slag used comes from the siderurgical industry located in the region of Andalucía, Spain. These slags have a continuous grading with different particle sizes up to a maximum of 22 mm. The existence of particles smaller than 0.063 mm is negligible, and there are mainly coarse and fine aggregates, in smaller quantities. An irregular shape of the particles can be observed by the processes of their formation.

It may be pointed out that electric arc furnace slag is formed in the metallurgical industry in the first stage called melting and in the electric arc furnace. These furnaces are fed with soft iron or steel scrap. In this melting stage, a series of phases are carried out such as oxidation, to remove manganese and silicon impurities, dephosphorization and the formation of foaming slag. All the impurities are accumulated in this foaming slag. The slag is extracted, forming the electric arc furnace slag after cooling and watering with water.

The production company then crushes the material and performs an economical particle size classification for filler of embankments. These slags are used in the present investigation.

In turn, the mission of the electric arc furnace slag is to replace the traditionally used coarse and fine siliceous aggregate. Therefore, it provides the necessary mineral skeleton of the bituminous mix, and it must be sufficiently resistant to support the repeated compressive loads of the traffic, as well as the roughness to provide good friction between the tire and the pavement. The slag from the electric arc furnace was washed and sieved by different sieves, obtaining the grading fractions necessary for the conformation of the grading curve.

2.1.2. Ladle Furnace Slag (LFS)

The ladle furnace slag comes, like the electric arc furnace slag, from the area of Andalucía, Spain. These slags have a very fine particle size derived directly from their formation process.

Ladle furnace slag is produced in the refining stage, after the melting stage in which the electric arc furnace slag is produced. The refining stage includes a series of phases such as deoxidation, allowing the removal of metal oxides from the furnace, desulphurization and decarburization of the

steel. For this phase to take place, the liquid from the electric arc furnace is transferred to the ladle furnace, being covered with slag, and continuously stirred by blowing inert gas, usually argon. Finally, this slag of much smaller particle size is removed and deposited in the vicinity for cooling.

The ladle furnace slag was taken directly from the producing industry as an undisturbed sample and will serve as a filler for the bituminous mixtures conformed. These ladle furnace slags provide the desired cementitious characteristics, which have been confirmed by various authors. For this purpose, they were sieved after drying at 105 ± 2 °C for 24 h by the 0.063 mm sieve.

2.1.3. Cellulose Fiber from the Papermaking Industry

Cellulose fibers are currently an unused waste produced from the cardboard manufacturing industry.

These fibers are formed in the process of producing packaging paper from recycled paper. The recycled paper is grinded with water to put the fibers in suspension, and then submitted to a physical separation with different sieves. Finally, a cyclonic separation is carried out. The waste from this cyclonic separation is transferred to a press to remove some of the water contained in the waste. This waste, after being pressed, is the one used in this research and is called cellulose fiber discarded by the paper industry.

Detailed cellulose fibers are the additive that was incorporated into the bituminous mix for the retention of a higher percentage of bitumen in the mix. These fibers have been taken from the production industry and have undergone a process of adaptation for use in bituminous mixtures. This process consists of a washing with a 30% sodium hydroxide solution. This pre-treatment is carried out with a double objective; on the one hand, the organic reactions that could be produced are paralyzed; on the other hand, any natural waxes that could be adhered to the fibers and that would prevent the correct adhesion with the bitumen of the bituminous mix are removed. Once this pre-treatment has been carried out, they are ground to achieve the smallest possible fiber size, making it possible to homogenize them during the mixing process in the bituminous mixture.

2.1.4. Bitumen

The bitumen used is a 50/70 bitumen as defined by European regulations, both numbers being the penetration rate at which it oscillates. This hard penetration bitumen is usually used in the Spanish regions due to the existing hot climates. It is a commercial bitumen without additives. Its technical data can be seen in Table 1.

Table 1. Technical specifications of the bitumen used.

Characteristics	Unit	Standard	Min	Max
Fresh binder				
Penetration (25 °C)	0.1 mm	UNE-EN 1426 [43]	50	70
Penetration index	-	UNE-EN 12591 [44]	-1.5	0.7
Softening point (R & B)	°C	UNE-EN 1427 [45]	46	54
Fraass point	°C	UNE-EN 12593 [46]	-	-8
Solubility in xylene	%	UNE-EN 12592 [47]	99.0	-
Flash point	°C	UNE-EN ISO 2592 [48]	230	-
Resistance to Hardening 163 °C (UNE-EN 12607-1) [49]				
Mass loss	%	UNE-EN 12607-1 [49]	-	0.5
Retained penetration	%	UNE-EN 1426 [43]	50	-
Increase in softening point (R & B)	°C	UNE-EN 1427 [45]	-	11

2.1.5. Hornfels Aggregate

Hornfels aggregate is a commonly used aggregate on important traffic roads mainly due to its excellent characteristics. This aggregate comes from the area of Andalucía, Spain, just like the other materials.

Hornfels rocks are a type of contact metamorphic rocks, very hard and with great resistance to the cycles of freezing and thawing. It contains a high proportion of quartz, graphite, biotite, iron oxide or feldspars, so it can be considered a quality siliceous rock.

The extraction of this material in quarries, being a hard rock, consumes a great quantity of explosives, since its resistance to fragmentation is high. In addition, its siliceous composition means that treatment and processing equipment often wear out, compared to limestone stone.

It is therefore an aggregate of excellent quality, in which significant greenhouse gas emissions are emitted during its extraction and with which electric arc furnace slag is to be compared. Therefore, its function within the bituminous mixtures created is that of a coarse and fine aggregate. To this end, as with the slag, the aggregate is received from the quarry and washed, to be subsequently sieved by different sieves that can form the selected grading curve.

2.1.6. Calcareous Filler

The problems derived from the lack of adhesion between the siliceous aggregates and the bitumen make the use of filler of limestone type common. Calcareous aggregates have much lower resistance than siliceous ones, as well as a lower resistance to the abrasion caused by the tire. Therefore, its use in important traffic roads is not usual or recommended.

However, its use as an inert filler makes possible the formation of a mastic of acceptable quality that coats the siliceous aggregates and forms a structure capable of withstanding the loads of traffic. Therefore, the function of the calcareous filler in the present investigation is the comparison with the properties of the bituminous mixtures conformed with it, with those of the mixtures conformed with ladle furnace slag.

The calcareous filler supplied by the producing company had a very fine particle size and did not need to be sieved, unlike the ladle furnace slag. This filler was dried at 105 ± 2 °C for 24 h to avoid the existence of water during the conformation of the bituminous mixtures.

2.2. Methodology

The methodology followed in the present investigation is composed of a series of logically ordered tests to obtain objective results on the quality of the execution of Stone Mastic Asphalt type bituminous mixtures with electric arc furnace slag, ladle furnace slag and cellulose fibers from the papermaking industry. To this end, bituminous mixtures manufactured were compared with bituminous mixtures conformed with commercial materials.

Based on this, the wastes were analyzed to determine their physical properties and chemical composition. In this way, the suitability of the materials for forming SMA mixtures for roads with high vehicle traffic was evaluated.

Subsequently, mixtures were conformed with traditional aggregates and with waste, as well as increasing percentages of bitumen. The groups of samples conformed were analyzed to obtain the physical and resistant properties, through the Marshall test.

Finally, and after evaluating the properties of the different mixtures, the optimum combination of materials was obtained for each family of samples studying the advantages of using electric arc furnace slags, ladle furnace slags and cellulose fibers.

The following sub-sections describe each of the research phases in detail.

2.2.1. Characterization of Raw Materials

The waste and commercial materials were treated as detailed before in order to be able to carry out physical and chemical characterization tests, as well as for use in subsequent tests.

Firstly, the electric arc furnace slag, ladle furnace slag and cellulose fibers were analyzed by elemental analysis, determining the percentage of carbon, nitrogen, hydrogen and sulfur in the samples. In turn, the slags were subjected to the X-ray fluorescence test, as they are inorganic materials, unlike cellulose fibers from the papermaking industry.

Once their chemical composition had been determined and the presence of contaminating elements that could prejudice the final bituminous mixture analyzed, a series of physical tests were carried out on the different wastes according to the function that each one plays within the bituminous mixture.

The cellulose fibers from the papermaking industry were evaluated with a scanning electron microscope (Carl Zeiss, Oberkochen, Germany) at different magnifications and after metallization with carbon. The size of the fibers obtained after pre-treatment and the existence of agglomerations that could impair the homogeneous distribution of the fibers in the bituminous mixture were thus observed.

The ladle furnace slag was subjected to particle density tests (standard UNE-EN 1097-7) [50], to evaluate the possible volumetric corrections required; bulk density tests (standard UNE-EN 1097-3) [51], to determine whether it is a powdery material that is detrimental to its proportioning; and plasticity index tests (standards UNE 103103 and UNE 103104) [52,53], to evaluate the possible existence of clayey particles that could create expanding problems in the final mix.

The electric arc furnace slag was subjected to particle density tests (standard UNE-EN 1097-7) [50], to determine whether volumetric corrections were necessary; a sand equivalent test (standard UNE-EN 933-8) [54], to evaluate the percentage of colloidal particles that could damage the final mixture; percentage of crushed surface tests (standard UNE-EN 933-5) [55]; and flakiness index tests (standard UNE-EN 933-3) [56], for the qualification of the aggregate, since the SMA mixture resists the loads of traffic on the mineral skeleton, and therefore the particles must have certain shapes; resistance to fragmentation tests (standard UNE-EN 1097-2) [57], to qualify the hardness of the material and its suitability for high traffic; resistance to freezing and thawing cycles tests (standard UNE-EN 1367-1) [58], to evaluate the aggregate's resistance to thermal fatigue; and determination of the value of polished stone (standard UNE-EN 1097-8) [59], to quantify the effect on the aggregate of the continuous tire friction of the with the pavement and, consequently, its durability through time.

2.2.2. Conformed of Bituminous Mixtures and Tests

Once the previous tests had been carried out, specific for each material and in accordance with the role that each material plays in the mixture, we proceeded to make the bituminous mixtures reflected in Table 2 with the materials detailed.

Table 2. Families of bituminous mixtures conformed with electric arc furnace slag, Hornfels aggregate, ladle furnace slag, calcareous filler and fibers from the papermaking industry.

Samples Groups	ACFC	ASFC	ASFS
Coarse aggregate	Hornfels aggregate	EAFS	EAFS
Fine Aggregate	Hornfels aggregate	EAFS	EAFS
Filler	Calcareous	Calcareous	LFS
Additives	Papermaking waste	Papermaking waste	Papermaking waste

As shown in Table 2, there are families of bituminous mixtures conformed with virgin materials and families conformed with waste. In this way, the quality of the incorporation of waste is easily comparable.

The materials that perform the function of aggregate, whether waste or natural aggregates, were dried and sieved by different sieves to obtain the desired grading curve. The grading curve used corresponds to the intermediate grading curve established by the grading envelope detailed in

the regulations of Circular Order OC 3/2019 [42]. The selection of this grading curve is motivated by an essential reason: to compare the difference between bituminous mixtures made with natural aggregates and those made with slag. To do so, they must have the same grading, thus avoiding secondary variables that could mask the final conclusions. In addition, cellulose fibers discarded from the papermaking industry were incorporated into all bituminous mixtures in a percentage of 0.5% in mass and regarding conventional aggregate (conventional aggregate density 2.65 t/m^3), as indicated by various studies on this type of mixture. The grading curve for the three families of samples is shown in Figure 1.

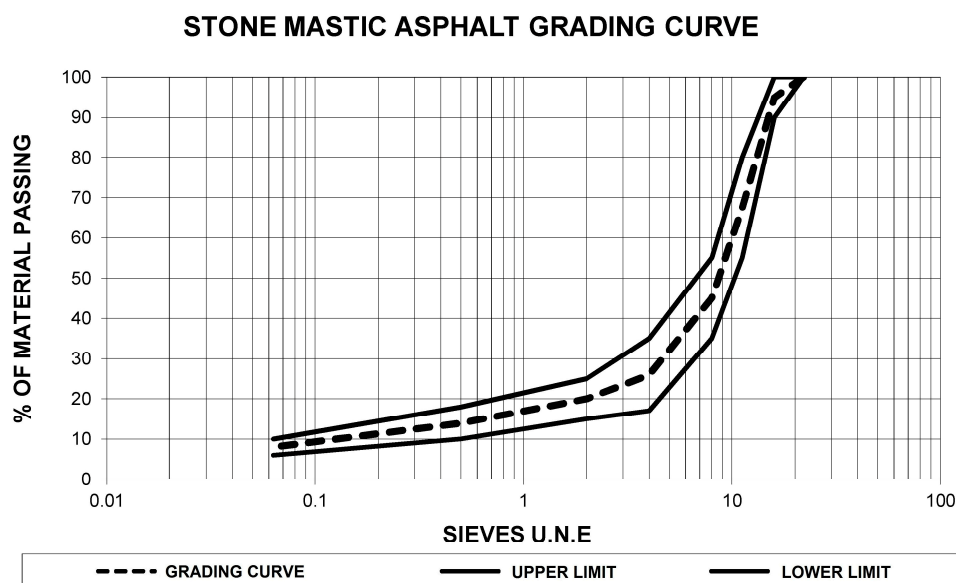


Figure 1. Grading curve of the different families of bituminous mixtures (ACFC, ASFC and ASFC) type SMA.

Once the grading curve was defined, different groups of samples were conformed of the three types of bituminous mixtures detailed in Table 2. In order to be able to compare the results faithfully, and given that the electric arc furnace slag has a higher density than the hornfels aggregates, the percentage of bitumen by volume was proportioned. This proportioning by volume allows an objective evaluation of the bitumen absorption capacity of bituminous mixtures with slag, since if mass proportioning was done, the optimum bitumen percentage would not be comparable due to the high density of the slag.

Based on the comments above, the families of mixtures were manufactured with percentages of bitumen in volume and regarding aggregate from 15% to 18% in 0.5% increments. To this end, the aggregates (natural or waste) were heated in an oven to a temperature of $180 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ for 1 h, as was the bitumen and cellulose fibers, and then mixed in an automatic planetary mixer (MECÁNICA CIENTÍFICA S.A., Madrid, Spain) for $10 \pm 1 \text{ min}$. The resulting mixture was extracted and compacted by a Marshall compactor (MECÁNICA CIENTÍFICA S.A., Madrid, Spain) with 50 blows per side to each specimen (standard UNE-EN 12697-30) [60]. The conformed specimens were left at ambient temperature for 24 h for subsequent mechanical stripping. A total of 8 Marshall-type samples were made for each percentage of bitumen in each family.

Once the groups of samples with increasing percentages of bitumen from each family of samples had been obtained, the physical properties were characterized. The tests carried out were on the maximum density of the bituminous mixture (standard UNE-EN 12697-5) [61] and bulk density (standard UNE-EN 12697-6) [62]. In turn, the void characteristics of the bituminous mixtures obtained were calculated (standard UNE-EN 12697-8) [63].

The Marshall test was carried out to evaluate the mechanical resistance of the families of bituminous mixtures conformed (standard UNE-EN 12697-14) [64]. With this test, the plastic deformations that

occur in each bituminous mix can be evaluated, this being an essential characteristic due to the high percentage of bitumen that SMA bituminous mixes have.

2.2.3. Determination of Optimal Material Combinations and Comparison of the Results

Once the mechanical and physical properties of the three families of samples with different bitumen percentages had obtained, the optimum combination of materials was then obtained. This optimum combination of materials was calculated graphically, taking Marshall stability as the main property. In other words, the percentage of volume of bitumen which provided the highest Marshall stability of each family (ACFC, ASFC and ASFS) was calculated, provided that permissible values were obtained for the physical properties and deformation of the bituminous mixtures.

With the optimum combinations of materials for the three families of samples (ACFC, ASFC and ASFS), samples were again made to evaluate the physical and mechanical properties obtained graphically, thus corroborating the quality of the material selection. In turn, binder drainage tests UNE-EN 12697-18 [65] were carried out, to evaluate that the fibers fulfilled their function within the conformed bituminous mixtures and that there were no bleeding of bitumen due to their high percentage; wheel-tracking tests [66] were also conducted, to evaluate the durability of the mixture before the continuous passage of vehicles.

The results obtained from the different sample families for their optimal material combination were compared. In this manner, the influence of the use of electric arc furnace slag and ladle furnace slag in the manufacture of Stone Mastic Asphalt mixtures with cellulose fibers from the papermaking industry can be objectively evaluated.

3. Results and Discussion

This section describes the results of the trials mentioned in the methodology, as well as the discussion about them. The series of trials logically ordered will condition the final conclusions, there being at all times a continuous process of feedback.

3.1. Characterization of Raw Materials

A significant percentage of waste is used in this research. These wastes are electric arc furnace slag, ladle furnace slag and discarded cellulose fibers from the paper industry. The use of waste has a number of environmental advantages as discussed above; however, this waste must be physically and chemically characterized in order not to induce problems in the final material.

Firstly, the discarded cellulose fibers from the paper industry were analyzed. These fibers were analyzed, after the treatment described in the methodology, in an elemental analyzer (TruSpec Micro, LECO, St. Joseph, MI, USA) to detect the percentage of carbon, nitrogen, hydrogen and sulfur in the sample. This test is essential for the material under study since, unlike slag, it is organic in nature. The results of the elemental analysis of the cellulose fiber waste from the papermaking industry are detailed in Table 3.

Table 3. Elemental analysis of cellulose fibers discarded by the papermaking industry.

Sample	Nitrogen, %	Carbon, %	Hydrogen, %	Sulfur, %
Cellulose fibers	0.447 ± 0.008	44.489 ± 0.325	5.884 ± 0.178	0.000 ± 0.000

As can be seen, the percentages of carbon and hydrogen are high, as they correspond to an organic material. On another point, the percentage of nitrogen contained in the sample is low, a fact that should be taken into account as it could damage the final bituminous mix. In turn, the percentage of sulfur is null. The low proportion of elements such as nitrogen and sulfur therefore ensures that these fibers are well incorporated into the bituminous mixtures, since otherwise they could leach contaminant elements and even affect the characteristics of the bituminous mixtures. It is important to

note that the sum of the elements analyzed does not correspond to 100% of the chemical composition, so there must be other inorganic chemical elements in the fibers analyzed. These inorganic chemical elements could correspond to the treatment carried out on the cellulose fibers before their use for conforming bituminous mixtures, this main element being sodium, since the fibers are treated with sodium hydroxide.

At the same time, and in order to characterize the cellulose fibers of the papermaking industry in a complete way, the scanning electron microscope test was carried out. This test aims to identify the shape of the fibers with high magnification, focusing mainly on their size and the existence of agglomerations. Both of these detailed factors have a significant influence on the correct mixing of the fibers with the aggregates and the bitumen. The scanning electron microscope therefore provided sufficient physical information to evaluate the suitability of the fibers for homogenization within the bituminous mix and, consequently, the increased retention of bitumen and the elimination of bleeding from the bituminous mix. Figure 2 shows the image of the cellulose fibers obtained with a scanning electron microscope.

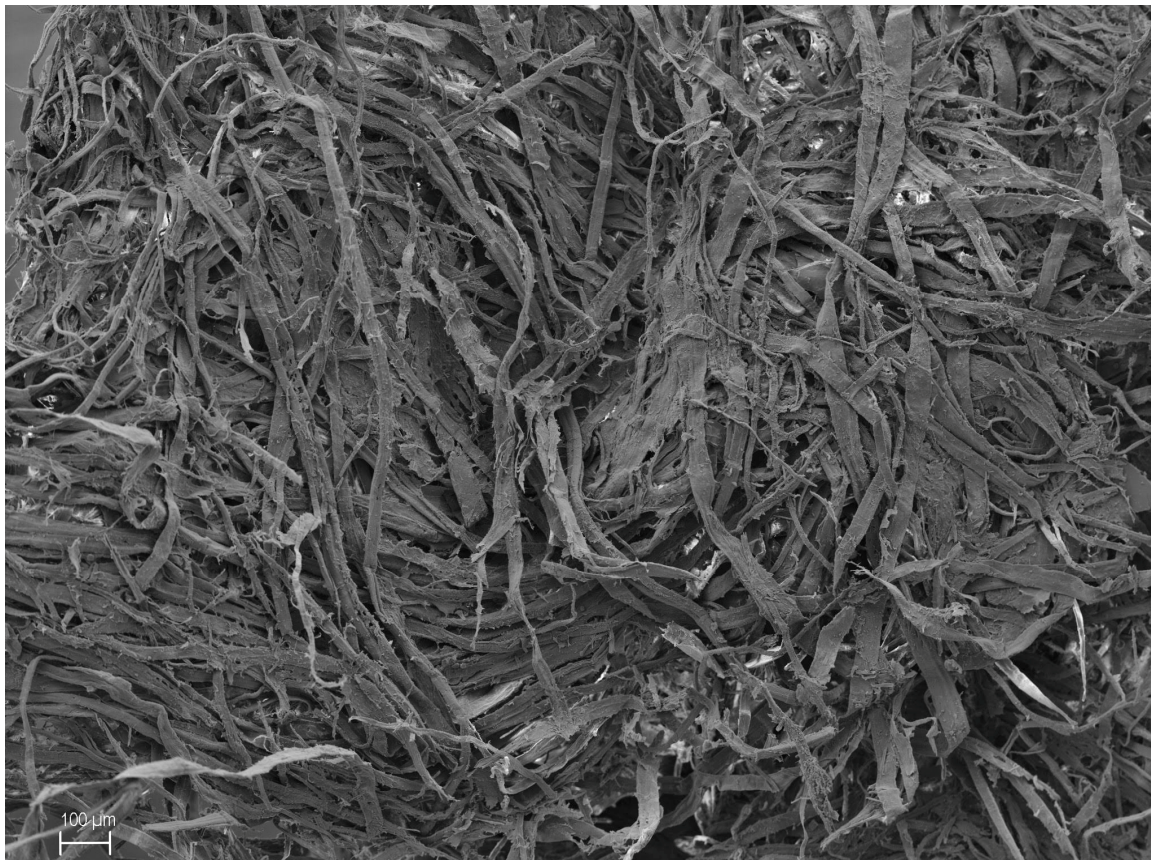


Figure 2. Image of the cellulose fibers of the paper industry obtained with the scanning electron microscope in the secondary option.

As can be seen in Figure 2, the cellulose fibers analyzed have millimetric dimensions, and there are no agglomerations of these fibers that could damage their homogeneous distribution in the bituminous mix. Therefore, they are considered to be suitable for use.

Once the cellulose fibers were analyzed, they were characterized the ladle furnace slag. The ladle furnace slag was used as a filler. Therefore, these slags must form, together with the bitumen and cellulose fibers, a mastic of adequate quality to resist the continuous traction loads of the pavement. For this reason, it is essential to characterize them chemically, determining the existence of chemical

cementitious compounds or polluting chemical elements that must be controlled in subsequent processes. Table 4 shows the results of the elemental analysis of the ladle furnace slag.

Table 4. Elemental analysis of the ladle furnace slag.

Sample	Nitrogen, %	Carbon, %	Hydrogen, %	Sulfur, %
LFS	0.007 ± 0.001	3.405 ± 0.068	1.386 ± 0.026	0.000 ± 0.000

Elemental analysis of the ladle furnace slag shows that it does indeed correspond to an inorganic material. The low percentage of nitrogen and sulfur, being the latter, of which is very harmful to the final bituminous mix, should be noted. If significant percentages are available of sulfur in the slag, a leachate test should be carried out later to confirm the retention of this element in the bituminous mixture. On the other hand, and due to the ladle furnace slag production process, the existing percentages of carbon and hydrogen come directly from the carbonate compounds and hydration of the oxides present in the slag, as reflected by X-ray fluorescence. This process is natural in this type of material and is mainly due to the open-air exposure of the waste after its extraction.

The X-ray fluorescence test provided sufficient information about the other chemical elements; this test is detailed in Table 5.

Table 5. Results of the X-ray fluorescence of ladle furnace slag.

Compound	Wt, %	Est. Error
CaO	40.19	0.25
MgO	19.38	0.20
SiO ₂	12.49	0.17
Al ₂ O ₃	7.29	0.13
Fe ₂ O ₃	2.38	0.08
MnO	0.936	0.047
S	0.548	0.027
TiO ₂	0.486	0.024
BaO	0.240	0.012
Na ₂ O	0.118	0.042
Cr ₂ O ₃	0.1100	0.0055
Cl	0.0833	0.0042
SrO	0.0733	0.0037
ZnO	0.0681	0.0034
K ₂ O	0.0506	0.0025
ZrO ₂	0.0425	0.0021
V ₂ O ₅	0.0179	0.0017
P	0.0138	0.0012
CuO	0.0117	0.0010
NiO	0.0082	0.0011
PbO	0.0048	0.0010
Nb ₂ O ₅	0.0046	0.0006
MoO ₃	0.0028	0.0009
Co ₃ O ₄	0.0021	0.0009
SeO ₂	0.0012	0.0005

The X-ray fluorescence (Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA) test shows a chemical composition of the ladle furnace slag that is logical and derived from its production process. The existence of calcium oxides, magnesium oxides and silicon oxides in a higher proportion is mainly due to the material added to the ladle furnace for steel purification. The incorporation of lime or dolomites in the ladle furnace creates this composition of the steel oxides. In addition, the function of ladle furnace slag is the deoxidation and desulfurization of steel, so it is logical to find metal oxides and sulfur in its composition. However, there are no chemical elements that could directly damage the

mechanical characteristics of the bituminous mixtures, nor are there any polluting elements in large proportion that could be leached out later and cause environmental pollution.

On the other hand, the physical properties of the ladle furnace slag were quantified. The main tests to determine these properties, for a material that plays the role of filler in the bituminous mix, are detailed in Table 6.

Table 6. Density and plasticity tests for the fine portion of ladle furnace slag.

Test	Standard	Value/Unit
Particle density	UNE-EN 1097-7 [50]	$2.71 \pm 0.07 \text{ t/m}^3$
Bulk density	UNE-EN 1097-3 [51]	$0.75 \pm 0.01 \text{ t/m}^3$
Plasticity index	UNE 103103/UNE 103104 [52,53]	No plasticity

It can be seen how the particle density of ladle furnace slag is slightly higher than that of a commercial calcareous filler. At the same time, the bulk density in kerosene of the slag reflects the behavior of a powdery material, which without producing proportioning problems in the factory if it has a reduced particle size is capable of adhering correctly with the bitumen and forming a quality mastic. The non-existence of plasticity avoids subsequent problems of expansiveness due to the existence of clayey particles. This lack of plasticity is due to the chemical composition of the ladle furnace slag, as it is mainly composed of calcium and magnesium oxides.

On the other hand, electric arc furnace slag plays the role of a coarse and fine aggregate in the bituminous mix. The tests carried out must therefore check the suitability of the slag for this purpose. For chemical characterization, the elemental analysis test was carried out; this test is reflected in Table 7.

Table 7. Elemental analysis of the electric arc furnace slag.

Sample	Nitrogen, %	Carbon, %	Hydrogen, %	Sulfur, %
EAFS	0.005 ± 0.000	0.164 ± 0.003	0.044 ± 0.001	0.000 ± 0.000

Elemental analysis of electric arc furnace slag mainly shows its inorganic composition. The low percentages of carbon and hydrogen reflect that these slags are a more stable material than ladle furnace slags, as no carbonated or hydrated processes of the chemical compounds take place. The null values of sulfur and nitrogen should be highlighted, so there will be no leaching of these elements in the final bituminous mixtures. The remaining chemical elements present in the sample of electric arc furnace slag were determined with the X-ray fluorescence test. This test is shown in Table 8.

The chemical composition of EAFS derives directly from its formation process. A high percentage of iron is to be expected, since it comes from steel, as well as a high percentage of calcium oxide due to its addition to obtain the final material. The silicon and aluminum oxides are common in the scrap that is used for the manufacture of new steels. Magnesium, manganese and chrome are also common in the composition of steel. The other elements are found in such small percentages that they cannot be extrapolated. The very low percentage of sulfur ensures that the EAFS leachate does not pose an environmental problem, as is the case with other pollutants. Otherwise, we would have to study the leaching of these chemical pollutants and compare them with the limit values established by the regulations. It should be noted that the existence of oxides, mainly calcium oxide, in the unaltered sample of electric arc furnace slag does not cause any subsequent problem of expansion in contact with water. This fact is derived from the industrial process of slag formation: after extracting the residue, the mixture is watered. This produces a carbonate of the oxides and therefore stability in its physical structure.

Table 8. X-ray fluorescence of electric arc furnace slag.

Compound	Wt, %	Est. Error
CaO	31.75	0.23
Fe ₂ O ₃	21.96	0.21
SiO ₂	17.52	0.19
Al ₂ O ₃	12.26	0.16
MnO	6.15	0.12
MgO	5.05	0.11
Cr ₂ O ₃	2.73	0.08
TiO ₂	0.955	0.047
BaO	0.658	0.033
P ₂ O ₅	0.319	0.016
SrO	0.186	0.0093
V ₂ O ₅	0.159	0.0079
Nb ₂ O ₅	0.0659	0.0033
S	0.0645	0.0032
ZrO ₂	0.0551	0.0028
K ₂ O	0.0289	0.0016
CuO	0.0254	0.0017
ZnO	0.0245	0.0016
Co ₃ O ₄	0.0147	0.0016
Eu ₂ O ₃	0.0137	0.0065
WO ₃	0.0104	0.0031
Y ₂ O ₃	0.0018	0.0005

It should be noted that European or American regulations governing the leaching of chemical elements of the aggregates for roads show restrictions on heavy metals, chlorides, fluorides or sulphates. These chemical elements are in a proportion of less than 1%, and even much less, in ladle furnace slags and electric arc furnace slags, not existing in their composition in some cases. Therefore, the leaching of these elements is minimal, as the electric arc furnace slag is mainly composed of calcium oxide, iron oxide, silicon oxide and aluminum oxide, as well as the ladle furnace slag of silicon oxide, calcium oxide and magnesium oxide. None of these chemical compounds mentioned are limited in their concentration in the leachate, as they do not produce environmental pollution. In addition, the coating of the slag with bitumen of the bituminous mixture quantitatively reduces the leaching of any element, therefore, the compliance of the quality standards is assured.

Once the chemical composition of the electric arc furnace slag had been analyzed and the absence of chemical elements that could damage the final bituminous mix during its manufacture or its working life had been assessed, the physical and resistance properties of the slag were determined. Table 9 shows the physical tests carried out on electric arc furnace slag.

Table 9. Density and plasticity tests for the fine portion of ladle furnace slag.

Test	Standard	Value/Unit
Particle density (coarse aggregate)	UNE-EN 1097-7 [50]	3.13 ± 0.05 t/m ³
Particle density (fine aggregate)	UNE-EN 1097-7 [50]	3.34 ± 0.07 t/m ³
Sand Equivalent test	UNE-EN 933-8 [54]	77 ± 2%
Broken surfaces (coarse aggregate)	UNE-EN 933-5 [55]	100 ± 1%
Flakiness index	UNE-EN 933-3 [56]	0 ± 1%

As can be seen in Table 9, the particle density of electric arc furnace slag is higher than that of a traditional aggregate (approximately 2.65 t/m³). This higher density is due to its chemical composition composed of metallic elements, mainly iron. However, a higher density does not affect the process of conforming bituminous mixtures or their final characteristics, it should only be taken into account for the correct proportioning of the bitumen and the additives, as well as their comparison. Therefore,

since the density of the ladle furnace slag is higher than that of the Hornfels aggregate, the bitumen was proportioned by volume so that the results were comparable and it was possible to evaluate which material is capable of absorbing a higher percentage of the bitumen. On the other hand, the sand equivalent test reflects the low proportion of colloidal particles that exist in the electric arc furnace slag, so there are no subsequent problems of expansiveness in the bituminous mix due to clayey materials. The excellent results obtained from the tests on the percentage of broken surfaces and the flakiness index should be highlighted. Both tests reflect the aptitude of the slag for the conformation of Stone Mastic Asphalt type mixtures, since this type of bituminous mixture has a discontinuous grading, the compression loads of the traffic are supported by the friction of the coarse aggregate. Therefore, the coarse aggregate is required to have optimum results from these tests so that no subsequent compaction of the bituminous mix occurs due to the continuous passage of vehicles. This excellent shape of the particles in the electric arc furnace slag is due to the production process, since the continuous oxygenation of the furnace causes the irregular shapes and edges that the particles have.

As mentioned, in Stone Mastic Asphalt mixes the repeated traction loads caused by traffic are borne by the mix mastic formed by the filler, bitumen and fibers. In turn, the compression loads are mainly supported by the coarse aggregate due to friction between particles and due to the discontinuous grading. Therefore, if designing bituminous mixtures for high traffic is intended, the coarse aggregate must have an adequate resistance to avoid its fracture. This resistance has been evaluated by the tests of resistance to fragmentation (standard UNE-EN 1097-2) [57] and resistance to freezing and thawing cycles (standard UNE-EN 1367-1) [58] reflecting values of $13 \pm 1\%$ and $0.551 \pm 0.016\%$, respectively. These results show the excellent resistance of electric arc furnace slag to both fracture and thermal fatigue and are therefore only comparable with excellent quality and very expensive aggregates, both economically and environmentally.

At the same time, the continuous friction of the tire with the pavement creates a polishing of the aggregate of the bituminous mixture, with the consequent decrease in safety for the driver. Therefore, it is essential to perform the determination test of the polished stone (standard UNE-EN 1097-8) [59]. This test reflected a value of 58 ± 1 . This result ensures an adequate resistance of the slag to the continuous passage of vehicles and a durability in time of the surface roughness.

In short, and based on the results of the waste characterization tests, it can be stated that both electric arc furnace slag and ladle furnace slag and cellulose fibers from the papermaking industry have suitable characteristics for use in bituminous mixtures. However, if it is true that special precautions must be taken to achieve successful incorporation into the bituminous mix.

3.2. Conforming of Bituminous Mixtures and Tests

Once the physical and chemical characteristics of the waste, bituminous mixtures of the families detailed in Table 2 were conformed, with the grading curve defined in Figure 1 and with percentages of bitumen in volume of aggregate of 15% to 18%.

All the samples conformed were analyzed to evaluate their physical properties and resistance. The first of the tests carried out on the bituminous mixtures was the bulk density test. This test is shown graphically in Figure 3.

As can be seen, the bulk density of bituminous mixtures with electric arc furnace slag is higher than the bulk density of mixtures with hornfels aggregate. This fact is fundamentally due to the higher density of the electric arc furnace slag, which does not negatively influence the subsequent results but it is a factor to be taken into account. The difference in density between mixtures made with calcareous filler or ladle furnace slag filler is very small, since the density of both materials is similar and as well the percentage of filler incorporation being lower. In turn, the maximum density of bituminous mixtures conformed is detailed in Figure 4.

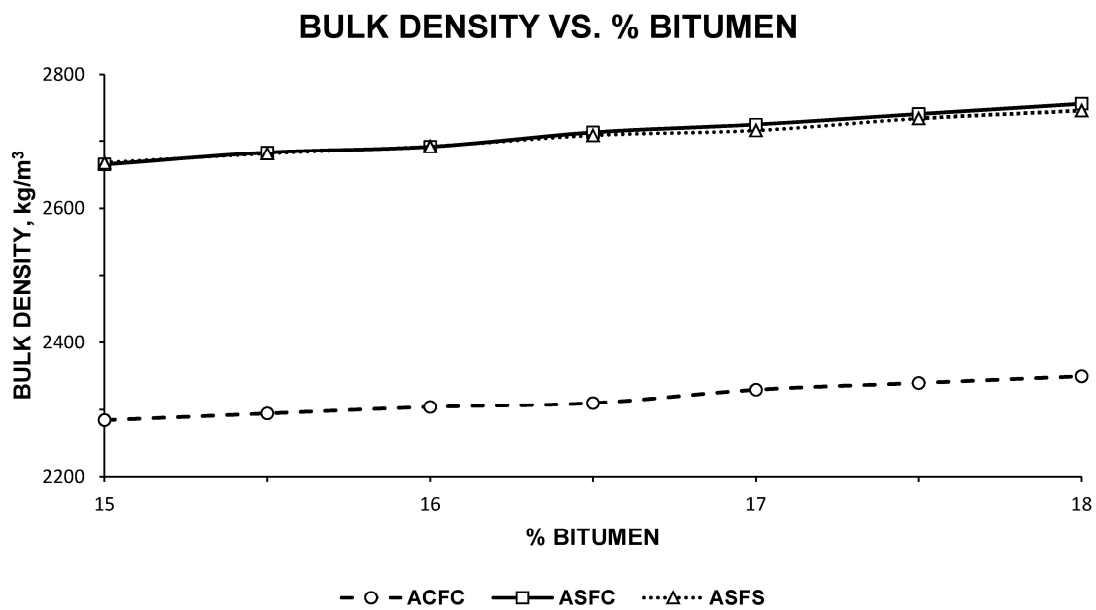


Figure 3. Bulk density of the families of bituminous mixtures ACFC, ASFC and ASFS with different percentages of bitumen in volume of aggregate.

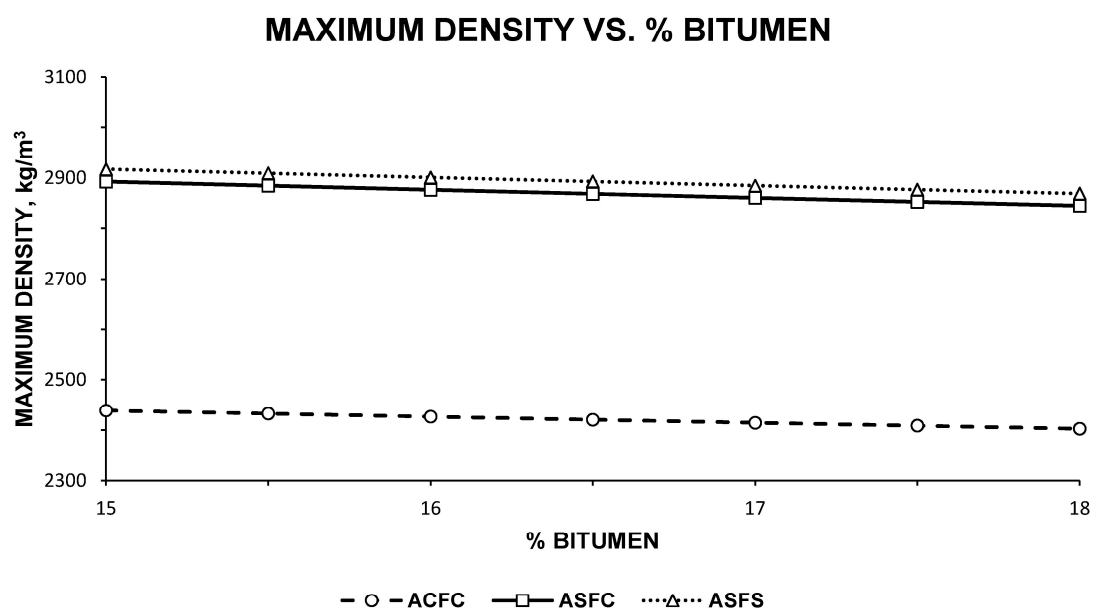


Figure 4. Maximum density of the families of bituminous mixtures ACFC, ASFC and ASFS with different percentages of bitumen in volume of aggregate.

Similarly to the previous case, the maximum density of mixtures that contain electric arc furnace slag is higher than those that incorporate hornfels aggregate, due to the higher density of this material. In turn, mixtures containing ladle furnace slag have a slightly higher density than mixtures conformed with calcareous filler. The results of this test, as well as that of bulk density, directly condition the percentage of voids in bituminous mixtures. The percentage of voids is essential to determine the behavior of the bituminous mixture, being limited by the regulations. The voids content of the different families of mixes is shown in Figure 5.

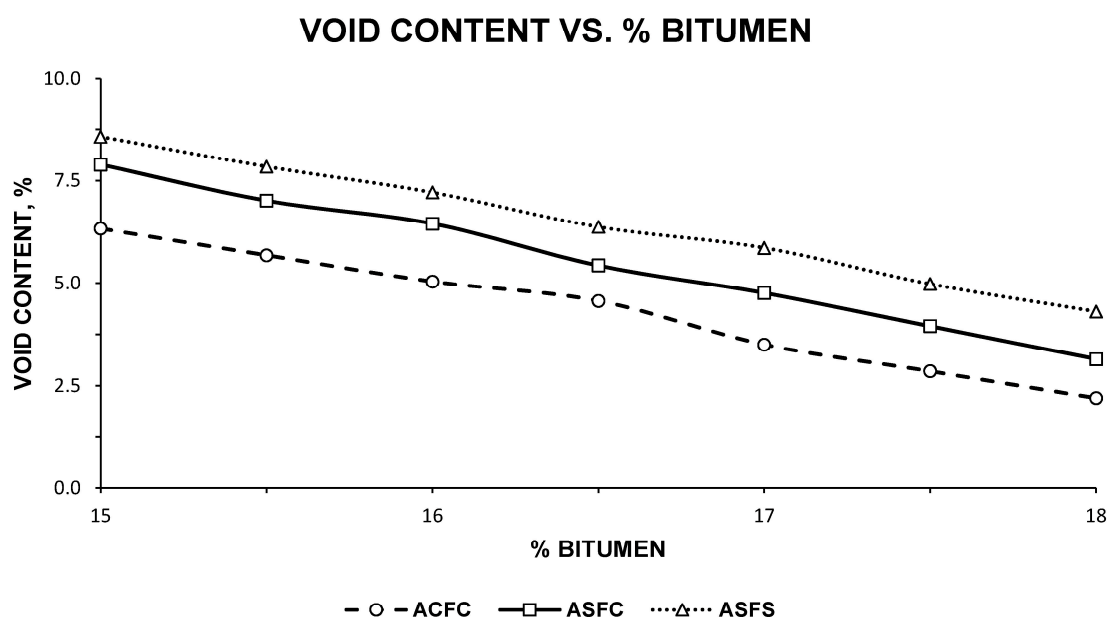


Figure 5. Void content of the families of bituminous mixtures ACFC, ASFC and ASFS with different percentages of bitumen in volume of aggregate.

The percentage of voids is an essential characteristic to avoid the formation of plastic deformations, to drain rainwater from the surface, to achieve greater friction between tire and pavement, and even to reduce noise caused by vehicle traffic. Therefore, Spanish regulations limit the percentage of voids to between 4% and 7% for this type of bituminous mixture. Based on the above, it can be seen that the mixture with hornfels aggregate has a lower void content than mixtures conformed to electric arc furnace slag. This fact indicates a higher absorption of bitumen by electric arc furnace slags and ladle furnace slags.

Depending on the detailed limitations, ACFC bituminous mixtures are valid up to 17% bitumen by volume and of aggregate. Higher percentages of bitumen would develop an unacceptable void content. On the other hand, ACFC bituminous mixtures have acceptable voids percentages from 15.5% to 17.5%, according to the limitations set by the regulations. In turn, ASFS bituminous mixtures show acceptable percentages of bitumen according to the same limitations from 16% to 18%.

The Marshall test will be in responsible for showing the mechanical resistance of the bituminous mixture and, in short, within the range detailed above by the voids content, the optimum combination of materials for each family of samples. Figure 6 shows the Marshall stability of the different families of samples.

The Marshall test reflects the superior mechanical resistance of bituminous mixtures conformed to electric arc furnace slag as an aggregate and ladle furnace slag as a filler. In turn, the mixture with electric arc furnace slag and calcareous filler presents a lower resistance than the previous one but slightly higher than the resistance of the bituminous mixture formed with hornfels aggregate and calcareous filler. Two conclusions can be drawn from this fact. On the one hand, the ladle furnace slag has a significant influence on the mechanical resistance of the bituminous mixes conformed, thanks to its cementitious characteristics; on the other hand, the use of electric arc furnace slag makes it possible to absorb a higher percentage of bitumen than hornfels aggregate and obtaining better mechanical resistance. This higher percentage of bitumen, together with the filler and fibers, obtains a quality mastic to withstand repeated traffic loads and, consequently, a longer durability of the bituminous mix over time. It should be noted that if no volume proportioning had been carried out, the higher density of the electric arc furnace slag would have masked the results and the detailed conclusions could not have been obtained.

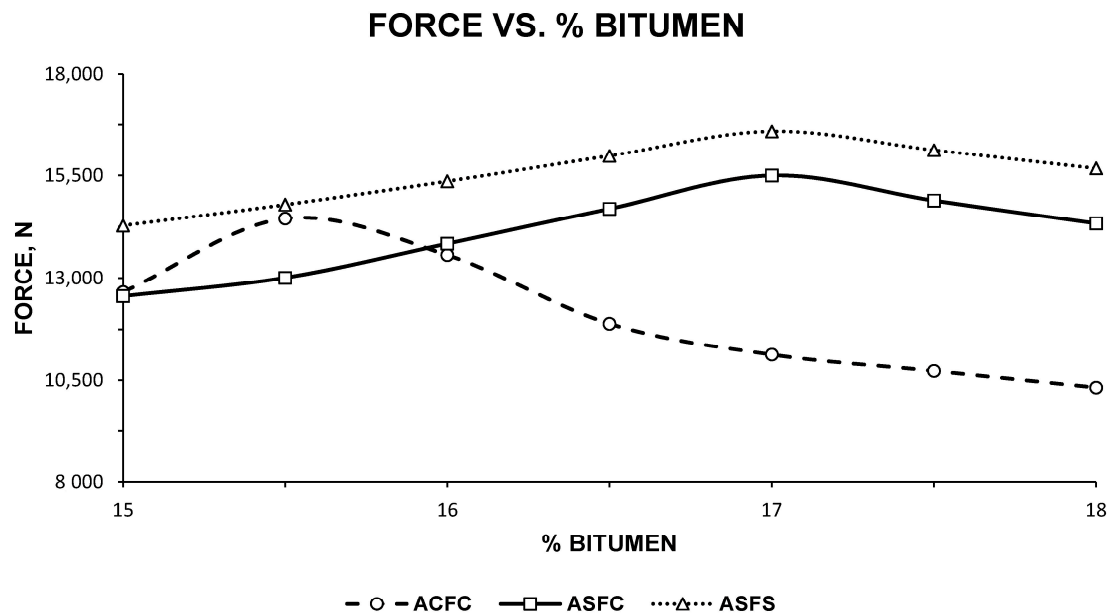


Figure 6. Marshall stability of the families of bituminous mixtures ACFC, ASFC and ASFS with different percentages of bitumen in volume of aggregate.

In addition, the Marshall test reflects the possibility of assessing the plastic deformations that may occur in the pavement. Therefore, it is essential to represent and evaluate the deformation of each family of bituminous mixtures. Marshall deformation is shown in Figure 7.

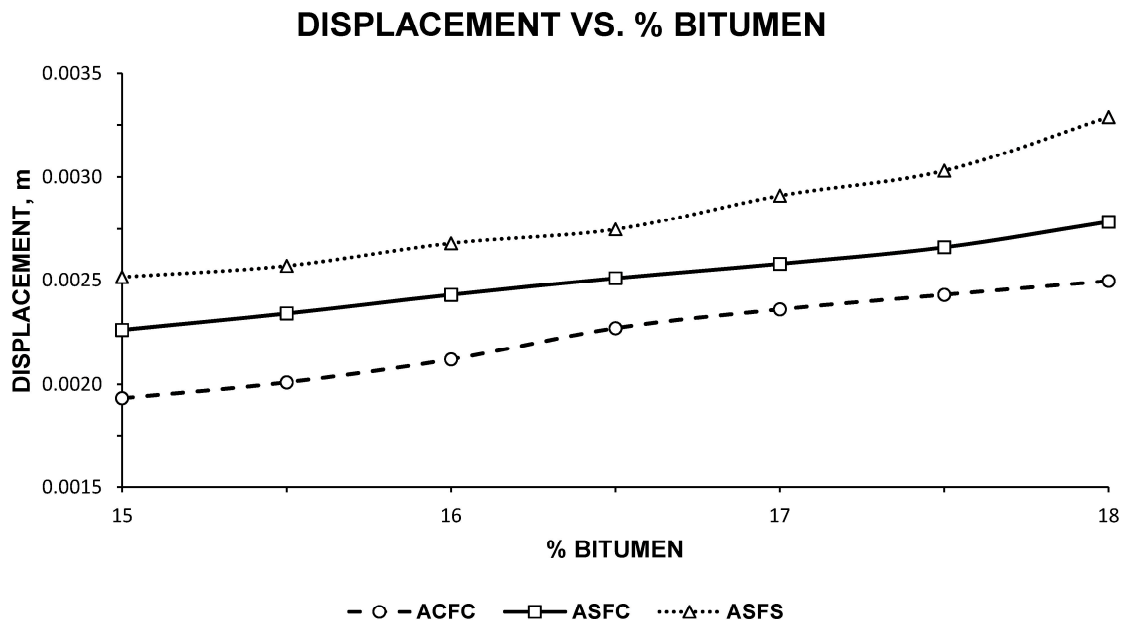


Figure 7. Marshall deformation of the families of bituminous mixtures ACFC, ASFC and ASFS with different percentages of bitumen in volume of aggregate.

Marshall deformation, or displacement during the test, is limited by the Spanish regulations for this type of bituminous mixture. The acceptable range of Marshall deformation results is 2 to 3 mm. Therefore, the ACFC family of bituminous mixtures has valid deformation percentages from 15.5% onwards. The ASFC family has acceptable bitumen percentages throughout its range to obtain adequate Marshall deformations. Finally, the ASFS family has adequate deformations, according

to the regulations, in the percentages of bitumen from 15% to 17.5%. It is worth noting the greater deformation of the bituminous mixtures conformed with electric furnace slag and, in particular, of the mixtures that incorporate ladle furnace slag filler. This greater deformation is mainly due to the higher percentage of bitumen; however, the variations between the different families are small.

3.3. Determination of Optimal Material Combinations and Comparison of Results

Once the families of bituminous mixtures (ACFC, ASFC and ASFS) had been physically and mechanically analyzed, the optimum combination of materials was obtained. For this purpose, the Marshall test was taken as the reference test, since the aim is to obtain a resistant bituminous mixture without problems of plastic deformation. Therefore, the percentage of bitumen that provided the greatest Marshall stability was selected, provided that the other physical properties were acceptable according to the regulations.

With this optimal combination of materials for each family, the previous tests were again carried out to corroborate the quality of the mixtures, as well as the binder drainage test (standard UNE-EN 12697-18) [65] and the wheel-tracking tests (standard UNE-EN 12697-22) [66]. The results of all the tests carried out for the optimum combination of materials in each family are detailed in Table 10.

Table 10. Test results for the optimal combination of materials of the different families of bituminous mixtures ACFC, ASFC and ASFS.

Test	Standard	ACFC	ASFC	ASFS
Optimal percentage of bitumen (in volume and of aggregate)	-	15.50%	17%	17%
Bulk density	UNE-EN 12697-6 [62]	2291 ± 46 t/m ³	2716 ± 53 t/m ³	2721 ± 54 t/m ³
Maximum density	UNE-EN 12697-5 [61]	2436 ± 49 t/m ³	2857 ± 57 t/m ³	2887 ± 58 t/m ³
Void content	UNE-EN 12697-8 [63]	5.9 ± 0.1%	4.9 ± 0.1%	5.8 ± 0.1%
Stability Marshall	UNE-EN 12697-14 [64]	14586 ± 287 N	15524 ± 307 N	16658 ± 331 N
Marshall Deformation	UNE-EN 12697-14 [64]	0.0020 ± 0.0001 mm	0.0026 ± 0.0001 mm	0.0028 ± 0.0001 mm
Binder drainage	UNE-EN 12697-18 [65]	0 ± 0%	0 ± 0%	0 ± 0%
Wheel tracking (10,000 cycles; 60 °C)	UNE-EN 12697-22 [66]	0.07 ± 0.01 mm	0.05 ± 0.01 mm	0.04 ± 0.01%

As can be seen in Table 10, the results reflected from the previous tests for the optimum combination of materials from the three families of bituminous mixtures are acceptable according to the Spanish standard ORDER OC 3/2019. In addition, the three detailed mixtures reflect excellent results in comparison with other types of bituminous mixtures and can all be used for important traffic roads.

Nevertheless, and with the aim of evaluating the influence that the incorporation of waste has on the bituminous mixture, the best results obtained by the ASFS family, the conform made up of electric arc furnace slag and ladle furnace slag, should be highlighted. With similar but slightly lower results, there is the ASFC bituminous mixture and, finally, with important differences in terms of resistance and bitumen percentages, there is the ACFC mixture.

More specifically, the densities of the three families differ because of the higher density of the slags used. However, the percentage of voids obtained is similar even if a higher percentage of bitumen is used in the mixtures with electric arc furnace slag. This higher percentage of bitumen, without producing bleeding problems as confirmed by the binder drainage test, implies a higher resistance of the mix to withstand the repeated traction loads of traffic. This fact is reflected by the wheel tracking test, with the best values being achieved in the ASFS and ASFC mixes. The Marshall stability of the bituminous mixtures reflects the excellent behavior of the use of electric arc furnace slag and ladle furnace slag, being the family with the highest resistance. Finally, we should comment on the correct functioning of cellulose fibers from the paper industry as an additive in the mixtures, since it has allowed the incorporation of higher percentages of bitumen in all the families without the production of bleeding.

4. Conclusions

The research methodology followed and the results of the tests, as well as the discussions held, reflect a series of partial conclusions that will lead to the final conclusion. In turn, it should be mentioned that the initial hypothesis was the aptitude of electric arc furnace slag, ladle furnace slag and cellulose fibers from the papermaking industry for the conformation of Stone Mastic Asphalt type bituminous mixtures. The partial conclusions obtained are described below:

- The cellulose fibers discarded from the papermaking industry have a mainly organic composition, without the presence of chemical elements such as sulfur in large proportions that could cause environmental pollution problems. The size of the fibers is millimetric, and there are no agglomerations of the same after their treatment.
- Ladle furnace slag has an inorganic composition, being composed mainly of calcium, magnesium and silicon oxides. These oxides are mainly responsible for the cementitious characteristics. At the same time, it has a particle density that is slightly higher than that of a conventional aggregate, as well as a reduced particle size as demonstrated by its apparent density. However, the ladle furnace slag does not possess any plasticity.
- Electric arc furnace slag has an inorganic composition consisting mainly of metal element oxides. The density of these slags is high, not reflecting the existence of a high percentage of colloidal particles. In turn, the shape of the particles makes them suitable for use in high traffic bituminous mixtures, since, together with their mechanical resistance, they are capable of withstanding the compressive loads of traffic without problems of fractures or deformations. The resistance to abrasion, by contact with the tire, is another of the particularities that it possesses.
- Bituminous mixtures conformed with cellulose fibers from the paper industry are suitable for retention of a higher percentage of bitumen without causing bleeding problems. This fact has been corroborated by the binder drainage test of the mixtures made with the optimum combination of materials.
- Bituminous mixtures conformed with electric arc furnace slag provide greater Marshall stability, with similar deformation values. In addition, they are capable of absorbing a higher percentage of bitumen than a conventional aggregate, forming a mastic of suitable quality for the repeated traction loads of traffic. This fact has been corroborated with the wheel tracking test.
- The ladle furnace slag gives the mix greater Marshall stability, even being used in a low proportion and as a filler in the bituminous mixes.
- The optimum combination of materials in the ACFC, ASFC and ASFS mixtures reflects a similar percentage of void index. However, the maximum and bulk density of the slag mixtures is higher than that of hornfels aggregate.

Based on the partial conclusions derived from the methodology presented in this investigation and according to the tests carried out, it can be stated that the incorporation of electric arc furnace slag, ladle furnace slag and cellulose fibers from the paper industry, creates Stone Mastic Asphalt type bituminous mixtures with a higher percentage of bitumen, greater Marshall stability, better behavior towards permanent deformations and with a similar content of voids or deformations. The quality of these materials is therefore assured for use in bituminous mixtures dedicated to roads for important traffic. It is important to highlight the importance of using unused waste to conformed materials, not only of similar but superior quality, as it reduces their disposal in landfills and avoids the extraction of new raw materials.

Author Contributions: Conceptualization, F.A.C.-I., F.J.I.-G., J.M.T.-S. and J.S.-M.; methodology, F.A.C.-I., F.J.I.-G., J.M.T.-S. and J.S.-M.; software, J.M.T.-S. and J.S.-M.; validation, F.A.C.-I. and F.J.I.-G.; formal analysis, F.A.C.-I. and F.J.I.-G.; investigation, J.M.T.-S. and J.S.-M.; resources, F.A.C.-I.; data curation, F.J.I.-G.; writing—original draft preparation, J.S.-M.; writing—review and editing, J.M.T.-S.; visualization, J.M.T.-S.; supervision, F.A.C.-I.; project administration, J.S.-M.; funding acquisition, F.A.C.-I. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Acknowledgments: Technical and human support provided by CICT of Universidad de Jaén (UJA, MINECO, Junta de Andalucía, FEDER) is gratefully acknowledged.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

- Shi, X.; Mukhopadhyay, A.; Zollinger, D.; Grasley, Z. Economic input-output life cycle assessment of concrete pavement containing recycled concrete aggregate. *J. Clean. Prod.* **2019**, *225*, 414–425. [CrossRef]
- Arabani, M.; Azarhoosh, A.R. The effect of recycled concrete aggregate and steel slag on the dynamic properties of asphalt mixtures. *Constr. Build. Mater.* **2012**, *35*, 1–7. [CrossRef]
- Plati, C. Sustainability factors in pavement materials, design, and preservation strategies: A literature review. *Constr. Build. Mater.* **2019**, *211*, 539–555. [CrossRef]
- Amin, M.; Khan, K.; Saleem, M.; Khurram, N.; Niazi, M. Influence of Mechanically Activated Electric Arc Furnace Slag on Compressive Strength of Mortars Incorporating Curing Moisture and Temperature Effects. *Sustainability* **2017**, *9*, 1178. [CrossRef]
- Pérez-Martinez, P.J. Energy consumption and emissions from the road transport in Spain: A conceptual approach. *Transport* **2012**, *27*, 383–396. [CrossRef]
- Turk, J.; Mauko Pranjić, A.; Mladenović, A.; Cotič, Z.; Jurjavčič, P. Environmental comparison of two alternative road pavement rehabilitation techniques: Cold-in-place-recycling versus traditional reconstruction. *J. Clean. Prod.* **2016**, *121*, 45–55. [CrossRef]
- Morseletto, P. Targets for a circular economy. *Resour. Conserv. Recycl.* **2020**, *153*, 104553. [CrossRef]
- Menaria, Y.; Sankhla, R. Use of Waste Plastic in Flexible Pavements-Green Roads. *Open J. Civ. Eng.* **2015**, *5*, 299–311. [CrossRef]
- Al-Busaltan, S.; Al Nageim, H.; Atherton, W.; Sharples, G. Green Bituminous Asphalt relevant for highway and airfield pavement. *Constr. Build. Mater.* **2012**, *31*, 243–250. [CrossRef]
- Jin, R.; Li, B.; Zhou, T.; Wanatowski, D.; Piroozfar, P. An empirical study of perceptions towards construction and demolition waste recycling and reuse in China. *Resour. Conserv. Recycl.* **2017**, *126*, 86–98. [CrossRef]
- Demirbas, A. Waste management, waste resource facilities and waste conversion processes. *Energy Convers. Manag.* **2011**, *52*, 1280–1287. [CrossRef]
- Anthonissen, J.; Van den bergh, W.; Braet, J. Review and environmental impact assessment of green technologies for base courses in bituminous pavements. *Environ. Impact Assess. Rev.* **2016**, *60*, 139–147. [CrossRef]
- Zheng, X.; Easa, S.M.; Ji, T.; Jiang, Z. Incorporating uncertainty into life-cycle sustainability assessment of pavement alternatives. *J. Clean. Prod.* **2020**, *264*, 121466. [CrossRef]
- Sangiorgi, C.; Lantieri, C.; Dondi, G. Construction and demolition waste recycling: An application for road construction. *Int. J. Pavement Eng.* **2015**, *16*, 530–537. [CrossRef]
- Lori, A.R.; Hassani, A.; Sedghi, R. Investigating the mechanical and hydraulic characteristics of pervious concrete containing copper slag as coarse aggregate. *Constr. Build. Mater.* **2019**, *197*, 130–142. [CrossRef]
- Lokesh, Y. Study On the Effect of Stone, Dust, Ceramic Dust and Brick Dust as Fillers on the Strength, Physical and Durability Properties of Bituminous Concrete (BC-II) Mix. *Int. J. Appl. Eng. Res.* **2018**, *13*, 203–208.
- Kalantar, Z.N.; Karim, M.R.; Mahrez, A. A review of using waste and virgin polymer in pavement. *Constr. Build. Mater.* **2012**, *33*, 55–62. [CrossRef]
- Zakaria, N.M.; Hassan, M.K.; Ibrahim, A.N.H.; Rosyidi, S.A.P.; Yusoff, N.I.M.; Mohamed, A.A.; Hassan, N. The use of mixed waste recycled plastic and glass as an aggregate replacement in asphalt mixtures. *J. Teknol.* **2018**, *80*, 79–88. [CrossRef]
- Song, W.; Huang, B.; Shu, X. Influence of warm-mix asphalt technology and rejuvenator on performance of asphalt mixtures containing 50% reclaimed asphalt pavement. *J. Clean. Prod.* **2018**, *192*, 191–198. [CrossRef]
- Fakhri, M.; Javadi, S.; Sedghi, R.; Arzjani, D.; Zarrinpour, Y. Effects of deicing agents on moisture susceptibility of the WMA containing recycled crumb rubber. *Constr. Build. Mater.* **2019**, *227*, 116581. [CrossRef]
- Escorias de Acería de Horno de Arco Eléctrico|CEDEX. Available online: <http://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/25/escorias-de-aceria-de-horno-de-arco-electrico/> (accessed on 29 April 2020).

22. Pranjić, I.; Deluka-Tibljaš, A.; Cuculić, M.; Šurdonja, S. Influence of Pavement Surface Macrotecture on Pavement Skid Resistance. *Transp. Res. Procedia* **2020**, *45*, 747–754. [[CrossRef](#)]
23. Mao, X.; Wang, J.; Yuan, C.; Yu, W.; Gan, J. A Dynamic Traffic Assignment Model for the Sustainability of Pavement Performance. *Sustainability* **2018**, *11*, 170. [[CrossRef](#)]
24. Zhang, H.; Hu, Z.; Hou, S.; Xu, T. Aging behaviors of bitumen degraded by the microbial consortium on bituminous pavement. *Constr. Build. Mater.* **2020**, *254*, 119333. [[CrossRef](#)]
25. Alkins, A.E.; Lane, B.; Kazmierowski, T. Sustainable Pavements. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* **2008**, *2084*, 100–103. [[CrossRef](#)]
26. Ameri, M.; Hesami, S.; Goli, H. Laboratory evaluation of warm mix asphalt mixtures containing electric arc furnace (EAF) steel slag. *Constr. Build. Mater.* **2013**, *49*, 611–617. [[CrossRef](#)]
27. Esther, L.A.; Pedro, L.G.; Irune, I.V.; Gerardo, F. Comprehensive analysis of the environmental impact of electric arc furnace steel slag on asphalt mixtures. *J. Clean. Prod.* **2020**, *275*, 123121. [[CrossRef](#)]
28. Lam, M.N.T.; Le, D.H.; Jaritngam, S. Compressive strength and durability properties of roller-compacted concrete pavement containing electric arc furnace slag aggregate and fly ash. *Constr. Build. Mater.* **2018**, *191*, 912–922. [[CrossRef](#)]
29. Lam, M.N.T.; Jaritngam, S.; Le, D.H. Roller-compacted concrete pavement made of Electric Arc Furnace slag aggregate: Mix design and mechanical properties. *Constr. Build. Mater.* **2017**, *154*, 482–495. [[CrossRef](#)]
30. Kavussi, A.; Qazizadeh, M.J. Fatigue characterization of asphalt mixes containing electric arc furnace (EAF) steel slag subjected to long term aging. *Constr. Build. Mater.* **2014**, *72*, 158–166. [[CrossRef](#)]
31. Pasetto, M.; Baldo, N. Experimental evaluation of high performance base course and road base asphalt concrete with electric arc furnace steel slags. *J. Hazard. Mater.* **2010**, *181*, 938–948. [[CrossRef](#)]
32. Ziaee, S.A.; Behnia, K. Evaluating the effect of electric arc furnace steel slag on dynamic and static mechanical behavior of warm mix asphalt mixtures. *J. Clean. Prod.* **2020**, *274*, 123092. [[CrossRef](#)]
33. Motevalzadeh, S.M.; Sedghi, R.; Rooholamini, H. Fracture properties of asphalt mixtures containing electric arc furnace slag at low and intermediate temperatures. *Constr. Build. Mater.* **2020**, *240*, 117965. [[CrossRef](#)]
34. Skaf, M.; Manso, J.M.; Aragón, Á.; Fuente-Alonso, J.A.; Ortega-López, V. EAF slag in asphalt mixes: A brief review of its possible re-use. *Resour. Conserv. Recycl.* **2017**, *120*, 176–185. [[CrossRef](#)]
35. Wu, S.; Xue, Y.; Ye, Q.; Chen, Y. Utilization of steel slag as aggregates for stone mastic asphalt (SMA) mixtures. *Build. Environ.* **2007**, *42*, 2580–2585. [[CrossRef](#)]
36. Sideris, K.K.; Tassos, C.; Chatzopoulos, A.; Manita, P. Mechanical characteristics and durability of self compacting concretes produced with ladle furnace slag. *Constr. Build. Mater.* **2018**, *170*, 660–667. [[CrossRef](#)]
37. Herrero, T.; Vegas, I.J.; Santamaría, A.; San-José, J.T.; Skaf, M. Effect of high-alumina ladle furnace slag as cement substitution in masonry mortars. *Constr. Build. Mater.* **2016**, *123*, 404–413. [[CrossRef](#)]
38. Sáez-De-Guinoa Vilaplana, A.; Ferreira, V.J.; López-Sabirón, A.M.; Aranda-Usón, A.; Lausín-González, C.; Berganza-Conde, C.; Ferreira, G. Utilization of Ladle Furnace slag from a steelwork for laboratory scale production of Portland cement. *Constr. Build. Mater.* **2015**, *94*, 837–843. [[CrossRef](#)]
39. Montenegro-Cooper, J.M.; Celemín-Matachana, M.; Cañizal, J.; González, J.J. Study of the expansive behavior of ladle furnace slag and its mixture with low quality natural soils. *Constr. Build. Mater.* **2019**, *203*, 201–209. [[CrossRef](#)]
40. Adolfsson, D.; Engström, F.; Robinson, R.; Björkman, B. Cementitious Phases in Ladle Slag. *Steel Res. Int.* **2011**, *82*, 398–403. [[CrossRef](#)]
41. Shi, C. Characteristics and cementitious properties of ladle slag fines from steel production. *Cem. Concr. Res.* **2002**, *32*, 459–462. [[CrossRef](#)]
42. Orden Circular OC 3/2019 Sobre Mezclas Bituminosa Tipo SMA. Available online: https://www.mitma.gob.es/recursos_mfom/comodin/recursos/oc3_2019.pdf (accessed on 29 October 2020).
43. UNE-EN 1426:2015 Bitumen and Bituminous Binders—Determination of Needle Penetration. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0055820> (accessed on 29 September 2020).
44. UNE-EN 12591:2009 Bitumen and Bituminous Binders—Specifications for Paving Grade Bitumens. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0044322> (accessed on 29 October 2020).

45. UNE-EN 1427:2015 Bitumen and Bituminous Binders—Determination of the Softening Point—Ring and Ball Method. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0055821> (accessed on 29 September 2020).
46. UNE-EN 12593:2015 Bitumen and Bituminous Binders—Determination of the Fraass Breaking Point. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0055822> (accessed on 29 October 2020).
47. UNE-EN 12592:2015 Bitumen and Bituminous Binders—Determination of Solubility. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0054574> (accessed on 29 October 2020).
48. UNE-EN ISO 2592:2018 Petroleum and Related Products—Determination of Flash and Fire Points—Cleveland Open Cup Method. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0060082> (accessed on 30 October 2020).
49. UNE-EN 12607-1:2015 Bitumen and Bituminous Binders—Determination of the Resistance to Hardening under Influence of Heat and Air—Part 1: RTFOT Method. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0054566> (accessed on 30 October 2020).
50. UNE-EN 1097-7:2009 Tests for Mechanical and Physical Properties of Aggregates—Part 3: Determination of Loose Bulk Density and Voids. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0042553> (accessed on 16 September 2020).
51. UNE-EN 1097-3:1999 Tests for Mechanical and Physical Properties of Aggregates—Part 3: Determination of Loose Bulk Density and Voids. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0009465> (accessed on 16 September 2020).
52. UNE 103103:1994 Determination of the Liquid Limit of a Soil by the Casagrande Apparatus Method. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0007830> (accessed on 29 September 2020).
53. UNE 103104:1993 Test for Plastic Limit of a Soil. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0007831> (accessed on 29 September 2020).
54. UNE-EN 933-8:2012+A1:2015/1M:2016 Tests for Geometrical Properties of Aggregates—Part 8: Assessment of Fines—Sand Equivalent Test. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0056257> (accessed on 16 September 2020).
55. UNE-EN 933-5:1999/A1:2005 Tests for Geometrical Properties of Aggregates—Part 5: Determination of Percentage of Crushed and Broken Surfaces in Coarse Aggregate Particles. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0034842> (accessed on 16 September 2020).
56. UNE-EN 933-3:2012 Tests for Geometrical Properties of Aggregates—Part 3: Determination of Particle Shape—Flakiness Index. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0049063> (accessed on 16 September 2020).
57. UNE-EN 1097-2:2010 Tests for Mechanical and Physical Properties of Aggregates—Part 2: Methods for the Determination of Resistance to Fragmentation. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0046026> (accessed on 16 September 2020).
58. UNE-EN 1367-1:2008 Tests for Thermal and Weathering Properties of Aggregates—Part 1: Determination of Resistance to Freezing and Thawing. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0040756> (accessed on 16 September 2020).
59. UNE-EN 1097-8:2010 Tests for Mechanical and Physical Properties of Aggregates—Part 8: Determination of the Polished Stone Value. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0044542> (accessed on 20 September 2020).
60. UNE-EN 12697-30:2019 Bituminous Mixtures—Test Methods—Part 30: Specimen Preparation by Impact Compactor. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0062608> (accessed on 30 October 2020).
61. UNE-EN 12697-5:2020 Test Methods—Part 5: Determination of the Maximum Density. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0063145> (accessed on 29 September 2020).
62. UNE-EN 12697-6:2012 Bituminous Mixtures—Test Methods for Hot Mix Asphalt—Part 6: Determination of Bulk Density of Bituminous Specimens. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0049868> (accessed on 29 September 2020).

63. UNE-EN 12697-8:2020 Bituminous Mixtures—Test Methods—Part 8: Determination of Void Characteristics of Bituminous Specimens. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0063146> (accessed on 29 September 2020).
64. UNE-EN 12697-14:2001 Bituminous Mixtures—Test Methods for Hot Mix Asphalt—Part 14: Water Content. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0025364> (accessed on 30 October 2020).
65. UNE-EN 12697-18:2018 Bituminous Mixtures—Test Methods—Part 18: Binder Drainage. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0061210> (accessed on 31 October 2020).
66. UNE-EN 12697-22:2008+A1:2008 Bituminous Mixtures—Test Methods for Hot Mix Asphalt—Part 22: Wheel Tracking. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0040736> (accessed on 31 October 2020).

Publisher’s Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



© 2020 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).