Escuela Politécnica Superior de Linares

Grado en Ingeniería Civil

UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Linares

Trabajo Fin de Grado

DESARROLLO DE UN PAQUETE DE FIRMES PARA UN NUEVO SISTEMA DE VÍA EN PLACA PARA EL TRANSPORTE FERROVIARIO

Alumno: López Moral, José Adrián.

Tutor: Prof. Dr. Corpas Iglesias, Francisco Antonio
Depto.: Departamento de Ingeniería Química, Ambiental y de los Materiales

Septiembre, 2014

AGRADECIMIENTOS

Este Trabajo de Fin de Grado supone el fin a mi carrera de Grado en Ingeniería Civil. Pudo ser escrito gracias al apoyo, colaboración y paciencia de muchas personas.

En primer lugar, me gustaría agradecer a mis padres, José y María Jesús, y a mis dos hermanas, Andrea María y Anabel, por todo su apoyo moral y económico. También, mencionar a toda mi familia por estar ahí para animarme.

A mis compañeros y amigos, tanto de la carrera como de mi pueblo, por los grandes momentos vividos y ayuda en momentos difíciles.

Agradecer a Dr. Francisco Antonio Corpas Iglesias por darme la oportunidad de trabajar en este proyecto y haciendo una mención especial D. Juan María Terrones Saeta por la gran ayuda que me ha dado a la hora de acometer la realización de este proyecto, dando sabios consejos de cara al trabajo. Sin ellos dos, no hubiese sido posible la realización de este trabajo.

Mencionar a los dos Jorges, ambos compañeros de laboratorio y amigos que me han ayudado cuando se lo he pedido.

Agradecer también a la E.P.S. Linares, y en especial al Departamento de Ingeniería Química, Ambiental y de los Materiales de esta misma Escuela, por haberme dado la oportunidad de realizar los ensayos necesarios en los laboratorios.

Y si se me olvida mencionar a alguien por agradecer su apoyo y confianza depositada en mí, gracias por todo.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS IV

ÍNDICE DE TABLAS VI

1. Resumen 1

2. Introducción 2

2.1. Componentes de la Vía en Placa 3

2.2. Características de la Vía en Placa 5

2.3. Justificación 6

2.4. Proceso y calendario de investigación 11

3. Objetivos 14

3.1. Objetivos técnicos 16

3.2. Objetivos económicos 17

3.3. Objetivos medioambientales 17

3.4. Objetivos estratégicos 18

4. Estado del arte de las patentes de Vía en Placa existentes 19

5. Materiales y métodos 23

5.1. Metodología empleada 23

5.2. Materiales 24

5.2.1. Áridos 24

5.2.2. Filler 25

5.2.3. Betunes 25

5.2.4. Aditivos 26

5.2.5. Mezclas Bituminosas 26

5.2.6. Riegos Bituminosos 30

5.3. Ensayos realizados 31

5.3.1. Equivalente de arena 32

5.3.2. Calcimetría de Bernard (áridos) 33

5.3.3. Resistencia a la fragmentación. Ensayo de los Ángeles 35

5.3.4. Determinación de la granulometría de las partículas (áridos) 36

5.3.5. Determinación de la forma de las partículas. Coeficiente de forma .. 36

5.3.6. Determinación de la resistencia a ciclos de hielo y deshielo 37

5.3.7. Determinación de las densidades, coeficiente de absorción y contenido de agua del árido grueso 38

5.3.8. Determinación del coeficiente de absorción del árido fino 40

5.3.9. Determinación de la limpieza superficial del árido grueso 40

5.3.10. Análisis granulométrico por tamizado del polvo mineral (filler) 42

5.3.11. Determinación del Límite Líquido, Plástico y el Índice de Plasticidad 42

5.3.12. Método para la determinación de la densidad aparente del filler en Tolueno 43

5.3.13. Calcimetría de Bernard (fillers) 44

5.3.14. Determinación del contenido en agua por secado en estufa 45

5.3.15. Determinación de la densidad real del filler. Método del Picnómetro 45

5.3.16. Preparación de probetas mediante compactador de impactos 48

5.3.17. Determinación de la densidad máxima 48

5.3.18. Determinación de la densidad aparente de probetas bituminosas 49

5.3.19. Determinación del contenido de huecos en las probetas bituminosas 49

5.3.20. Determinación de la estabilidad y la deformación Marshall 51

5.3.21. Determinación del escurrimiento del ligante de mezclas bituminosas 52

5.3.22. Estudio del comportamiento a fatiga de mezclas asfálticas mediante el ensayo BTD (Barcelona Tracción Directa) 53

5.4. Equipos utilizados 57

5.4.1. Equipos de preparación y acondicionamiento del material 58

5.4.2. Equipos de toma de medidas y resultados 60

6. Resultados y discusión 61

6.1. Resultados Equivalente de arena 61

6.2. Resultados Calcimetría de Bernard (áridos) 64

6.3. Resultados de la resistencia a la fragmentación. Ensayo de los Ángeles 66

6.4. Resultados de la granulometría de las partículas (áridos) 69

6.5. Resultados de la forma de las partículas. Coeficiente de forma 71

6.6. Resultados de la resistencia a ciclos de hielo y deshielo 71

6.7. Resultados de las densidades, coeficiente de absorción y contenido de agua del árido grueso 73

6.8. Resultados del coeficiente de absorción del árido fino 75

6.9. Resultados de la limpieza superficial del árido grueso 76

6.10. Resultados del análisis granulométrico por tamizado del polvo mineral (filler) 77

6.11. Resultados del Límite Líquido y Plástico y del Índice de Plasticidad ... 79

6.12. Resultados de la densidad aparente del filler en Tolueno 80

6.13. Resultados Calcimetría de Bernard (fillers) 82

6.14. Resultados del contenido en agua por secado en estufa 83

6.15. Resultados de la densidad real del filler. Método del Picnómetro 85

6.16. Resultados de las densidades, contenido de huecos, estabilidad, deformación y escurrimiento del ligante 86

6.17. Resultados del estudio del comportamiento a fatiga de mezclas asfálticas mediante el ensayo BTD 94

7. Conclusiones y futuras líneas de investigación 100

8. Referencias bibliográficas 105

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Esquema 3D del sistema de vía en placa [34] 7
Figura 2.2: Alzado. Esquema del sistema de vía en placa [34] 8
Figura 2.3: Diagrama de Gantt de los ensayos de laboratorio del proyecto 12
Figura 5.1: Fibras de celulosa 26
Figura 5.2: Árido, filler y fibra de la mezcla SMA 11 27
Figura 5.3: Huso granulométrico para la mezcla SMA11 [15] 28
Figura 5.4: Árido y filler de la mezcla AC 22 S 29
Figura 5.5: Huso granulométrico para la mezcla AC 22 S (S-20) [19] 30
Figura 5.6: Curva Estabilidad-Deformación Marshall 51
Figura 5.7: Etapas para la compactación de las probetas a usarse en el ensayo BTD [31] . 53
Figura 5.8: Curva de Rotura que se obtiene del Modo Estático [31] 54
Figura 5.9: Probeta a tracción [31] 54
Figura 5.10: Carga aplicada en la etapa dinámica del ensayo BTD [31] 54
Figura 5.11: Deformación crítica “dC” del ensayo BTD [31] 54
Figura 5.12: Correlación entre los valores “dR” y “dC” del Ensayo BTD 56
Figura 5.13: Relación entre ε_i /dC y Número de Ciclos “N” 57
Figura 5.14: Estufa 58
Figura 5.15: Hornillo 58
Figura 5.16: Recipiente de vacío 58
Figura 5.17: Baño María 58
Figura 5.18: Molinillo 58
Figura 5.19: Tamices 58
Figura 5.20: Mezcladora 59
Figura 5.21: Compactadora 59
Figura 5.22: Desmoldadora 59

Figura 5.23: Compactadora Marshall 59
Figura 5.24: Balanza hidrostática 60
Figura 5.25: Cuchara de Casagrande 60
Figura 5.26: Báscula 60
Figura 5.27: Tambor giratorio (Los Ángeles) 60
Figura 5.28: Probetas cilíndricas graduadas 60
Figura 5.29: Calcímetro de Bernard 60
Figura 6.1: Huso granulométrico y Curva granulométrica SMA 11 87
Figura 6.2: Gráfico Densidad SMA 11 88
Figura 6.3: Gráfico Estabilidad SMA 11 88
Figura 6.4: Gráfico Deformación SMA 11 88
Figura 6.5: Gráfico Huecos Mezcla SMA 11 88
Figura 6.6: Gráfico Huecos Rellenos SMA 11 88
Figura 6.7: Gráfico Huecos Áridos SMA 11 88
Figura 6.8: Huso granulométrico y Curva granulométrica AC 22 S 89
Figura 6.9: Gráfico Densidad AC 22 S 90
Figura 6.10: Gráfico Estabilidad AC 22 S 90
Figura 6.11: Gráfico Deformación AC 22 S 90
Figura 6.12: Gráfico Huecos Mezcla AC 22 S 90
Figura 6.13: Gráfico Huecos Rellenos AC 22 S 90
Figura 6.14: Gráfico Huecos Áridos AC 22 S 90
Figura 6.15: Curva Carga (KN) – Desplazamiento (mm). Probeta “A” SMA 11 94
Figura 6.16: Curva Carga (KN) – Desplazamiento (mm). Probeta “B” SMA 11 95
Figura 6.17: Curva Carga (KN) – Desplazamiento (mm). Probeta “1” AC 22 S 95
Figura 6.18: Curva Carga (KN) – Desplazamiento (mm). Probeta “2” AC 22 S 96

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Catálogo de secciones de firme para las categorías de tráfico pesado T00 a T2, en función de la categoría de explanada [37] 9

Tabla 4.1: Clasificación de los sistemas comerciales de vía en placa más habituales [1]... 20

Tabla 4.2: Comportamiento de los distintos tipos de vía en placa [1]..... 21

Tabla 5.1: Huso granulométrico para la mezcla SMA11 [15]..... 28

Tabla 5.2: Ensayos a realizar a la mezcla SMA11 28

Tabla 5.3: Curva granulométrica y huso para la mezcla AC 22 S (S-20) [19]..... 29

Tabla 5.4: Ensayos a realizar a la mezcla AC 22 S (S-20)..... 30

Tabla 6.1: Equivalente de arena de Gran Parada (131023-1-1) 61

Tabla 6.2: Equivalente de arena de Rambla Orica (131023-2-1)..... 62

Tabla 6.3: Equivalente de arena de Rabla Orica (131023-2-2) 62

Tabla 6.4: Equivalente de arena de J. Abarca (131023-3-1) 62

Tabla 6.5: Equivalente de arena de J. Abarca (131023-3-2) 63

Tabla 6.6: Equivalente de arena de Aleros Oscuros (131120-4-1)..... 63

Tabla 6.7: Equivalente de arena de Aleros Amarillos (131120-4-2)..... 63

Tabla 6.8: % $CaCO_3$ de Gran Parada (131023-1-1) 64

Tabla 6.9: % $CaCO_3$ de Rambla Orica (131023-2-1)..... 65

Tabla 6.10: % $CaCO_3$ de J. Abarca (131023-3-1)..... 65

Tabla 6.11: % $CaCO_3$ de Aleros Oscuros (131120-4-1) 65

Tabla 6.12: % $CaCO_3$ de Aleros Amarillos (131120-4-2) 65

Tabla 6.13: Valor del coeficiente de Los Ángeles de todas las muestras de árido..... 67

Tabla 6.14: PG-3 Tabla 542.4 - Coeficiente de los ángeles del árido grueso 68

Tabla 6.15: Análisis granulométrico de J. Abarca (131120-3-3) 69

Tabla 6.16: Análisis granulométrico de Aleros Oscuros (131120-4-1)..... 70

Tabla 6.17: Coeficiente de forma de J. Abarca y Aleros Oscuros..... 71

Tabla 6.18: Ensayo ciclos hielo-deshielo para J. Abarca (131120-3-3) 72

Tabla 6.19: Ensayo ciclos hielo-deshielo para Aleros Oscuros (131120-4-1) 72

Tabla 6.20: Determinación de parámetros del J. Abarca (131120-3-3) 73

Tabla 6.21: Determinación de parámetros de los Aleros Oscuros (131120-4-1) 74

Tabla 6.22: Coeficiente de Absorción del árido fino J. Abarca (131120-3-3) 75

Tabla 6.23: Coeficiente de limpieza superficial de J. Abarca (131120-3-3) 76

Tabla 6.24: Análisis granulométrico del Filler A 77

Tabla 6.25: Análisis granulométrico del Filler B 78

Tabla 6.26: Tabla 542.8 (PG-3) – Especificaciones para la granulometría del polvo mineral 78

Tabla 6.27: Determinación del LL, LP e IP del Filler A 79

Tabla 6.28: Determinación del LL, LP e IP del Filler B 80

Tabla 6.29: Determinación de la densidad aparente del Filler A en Tolueno 81

Tabla 6.30: Determinación de la densidad aparente del Filler B en Tolueno 81

Tabla 6.31: % $CaCO_3$ de Filler A 82

Tabla 6.32: % $CaCO_3$ de Filler B 82

Tabla 6.33: Contenido en agua del Filler A por secado en estufa 84

Tabla 6.34: Contenido en agua del Filler B por secado en estufa 84

Tabla 6.35: Densidad real del Filler A por el método del picnómetro 85

Tabla 6.36: Densidad real del Filler B por el método del picnómetro 85

Tabla 6.37: Granulometría de la SMA 11 86

Tabla 6.38: Estabilidad, Deformación y % de Huecos en la SMA 11 87

Tabla 6.39: Granulometría AC 22 S 89

Tabla 6.40: Estabilidad, Deformación y % de Huecos en la AC 22 S 89

Tabla 6.41: Criterios de dosificación empleando el aparato Marshall 91

Tabla 6.42: Dotación mínima de ligante (% en masa sobre el total del árido seco, incluido el polvo mineral) 91

Tabla 6.43: Parámetros del ensayo BTD para probetas SMA 11 96

Tabla 6.44: Parámetros del ensayo BTD para probetas AC 22 S 97

Tabla 6.45: Deformación Crítica (dC) de las Probetas SMA 11 97

Tabla 6.46: Deformación Crítica (dC) de las Probetas AC 22 S 97

Tabla 6.47: Módulo Dinámico SMA 11 98

Tabla 6.48: Módulo Dinámico AC 22 S 98

Tabla 6.49: Características mecánicas de mezclas bituminosas 99

1. Resumen

El presente trabajo de investigación consiste en la creación de un paquete de firmes que se adecúe a las solicitaciones a las que se verá sometido en su aplicación en un nuevo sistema de vía en placa para el transporte ferroviario.

Los problemas surgidos durante el proceso de investigación consistieron en los siguientes apartados: por un lado, se ha buscado incluir el mayor porcentaje posible de residuos como material constructivo para la fabricación del firme, lo que ha llevado a la realización de numerosos ensayos debido a que dichos desechos no han sido utilizados anteriormente para tales fines, por lo que no existen referencias, en la práctica, que indiquen que son adecuados para su uso; por otro lado, al tratarse de vía en placa, es decir, de un sistema constructivo de líneas ferroviarias relativamente poco empleado en España, ha surgido el problema de no disponer de normativa que rija la utilización de firmes en tramos de ferrocarril, por lo que ha sido necesario guiarse por la normativa de carreteras a la hora de interpretar los resultados de los ensayos.

La investigación se ejecutó en base a la metodología de trabajo [5.1. Metodología empleada], obteniendo información de diversas fuentes, como documentos suministrados por el tutor, así como bibliografía específica consultada en la biblioteca de la E.P.S. de Linares y de Internet. A lo largo de la elaboración de los ensayos, se han analizado tres materiales. Primero, se comenzaron los ensayos de los desechos de escombrera que formarían parte del árido del firme. Posteriormente, se efectuaron los correspondientes ensayos al filler, proveniente de desechos denominados lodos de corte. Por último, una vez analizados tanto el árido como el filler, se procedió a examinar las mezclas bituminosas, que incluyen estos dos componentes anteriormente citados, que formarían el paquete de firmes.

Tras la finalización de todos los ensayos, se obtuvieron los resultados necesarios para la formulación de conclusiones, las cuales pretenden dar a conocer las características de los residuos empleados en la fabricación de las mezclas bituminosas, de manera que se tomen las decisiones oportunas de cara a la elección de la distribución de los distintos materiales en la elaboración del paquete de firmes.

2. Introducción

Las vías de comunicación tienen una elevada importancia dentro de la sociedad moderna. De hecho, el avance tecnológico de un país se mide normalmente según el grado de desarrollo de las comunicaciones existentes. Por ello, actualmente se apuesta por la investigación de estos tipos de medios, entre los cuáles se encuentran el transporte por ferrocarril.

En España, la historia ferroviaria comienza en el siglo XIX y continúa su crecimiento hasta la actualidad. En sus inicios, este tipo de transporte consistía en una alternativa cómoda y fiable para el traslado de mercancías. En cambio, con el paso del tiempo se ha dado un notable crecimiento en el tránsito de pasajeros. Por consiguiente, actualmente el trasporte ferroviario constituye un medio de comunicación de vital importancia dentro del país.

A lo largo de los años, han ido surgiendo una serie de avances y mejoras en los sistemas constructivos de la infraestructura por la que discurre el ferrocarril. El sistema más utilizado en España para la construcción de líneas ferroviarias ha sido el tradicional sistema de vía sobre balasto. Éste aporta una serie de ventajas como son su bajo presupuesto, comparado con otros sistemas, y su gran facilidad para llevar a cabo reparaciones. Con el paso de los años y la aparición de la alta velocidad, la vía sobre balasto presenta una serie de deficiencias, por lo que se ha investigado otro tipo de sistemas. Es aquí donde surge la vía en placa.

Este nuevo sistema de construcción de líneas ferroviarias denominado vía en placa se basa fundamentalmente en la sustitución del balasto por placas rígidas de hormigón y/o placas de asfalto. Con ello se consigue una serie de propiedades que serán descritas posteriormente [2.2. Características de la Vía en Placa].

El coste de construcción de la vía en placa ha sido hasta ahora considerablemente mayor que el de una vía tradicional de balasto. Esta diferencia hace de la vía sobre placa un sistema menos competitivo en ese sentido, aunque por otro lado existen características que dan puntos a favor a la vía en placa como es el mantenimiento, el cual acarrea costes

mucho menores debido a que es mínimo, manteniendo además intactas sus características resistivas y de funcionalidad durante muchos años de su vida útil.

En los países desarrollados está aumentando la conciencia hacia la conservación del Medio Ambiente. Con la vía en placa desaparece el empleo de balasto en las líneas ferroviarias, con lo que se consigue disminuir considerablemente el consumo de este material, por lo que por ese lado se contribuye a la conservación del medio. Por otro lado, se están llevando a cabo numerosos estudios, entre los que se encuentra este trabajo de investigación, que van encaminados hacia el reciclaje de material.

En concreto, en la investigación que se lleva a cabo en este trabajo, se busca dar utilidades constructivas a distintos materiales, considerados como desechos, para su empleo en la fabricación de mezclas bituminosas, las cuales serán las que constituyan las diferentes capas del paquete de firmes.

Además, la investigación estará enfocada al desarrollo del paquete de firmes mencionado anteriormente, el cual irá alojado en el interior de un nuevo sistema de vía en placa. Las características buscadas en el firme son que sirva como parte portante y que resista a las solicitaciones a las que se verá sometido por el paso del tren. También se buscará dotar de una cierta elasticidad al conjunto de vía en placa, ya que la placa de hormigón situada por encima del firme carece de dicha característica.

A continuación se va entrar en mayor detalle en la explicación tanto de las partes que componen la vía en placa como de sus características. Además, se procederá a dar detalles de la manera empleada para la determinación del paquete de firmes y se expondrá el proceso que se ha llevado a cabo en la realización de este trabajo de investigación.

2.1. Componentes de la Vía en Placa

El método de construcción de tramos ferroviarios por el sistema de vía en placa consiste principalmente en la sustitución del balasto por un material más rígido (hormigón o asfalto) cuyo uso es habitual en los pavimentos viarios. Su estructura constructiva, independientemente de los materiales empleados, se compone de: plataforma, placa base,

placa principal, sujeciones, carriles, elastómeros y, en aquellos casos que lo requieran, elementos intermedios (por ejemplo placas metálicas, bloques, traviesas o losas).

La plataforma servirá de apoyo a los elementos que componen la vía en placa. Una plataforma de escasa capacidad portante y con un drenaje deficiente puede generar un proceso de socavación bajo la placa. En ese caso habría que mejorar las características de la plataforma mediante estabilizaciones, zahorras, suelo-cementos, etc., en el caso de construir sobre un terreno mediocre.

La placa base se sitúa sobre la plataforma y su función principal será la de distribuir las cargas sobre el terreno y servir de capa protectora en la parte superior frente al agua. Para su construcción se emplean diversos materiales como pueden ser suelos estabilizados con cemento o cal.

Sobre la placa de base se sitúa la placa principal que se encargará de soportar los carriles, quedando éstos fijados a la placa bien directamente por los elementos de sujeción o a través de bloques prefabricados. En función del material que se utilice para la sustitución del balasto se tendrán dos tipos de placa principal: placas de hormigón, las cuáles son las más habituales, y placas de asfalto.

Las placas asfálticas basan su funcionamiento en la sustitución de la capa elástica del balasto por una o varias capas asfálticas que dotan de cierto grado de elasticidad a la vía en placa. El resto de elementos de la vía con balasto son necesarios como son el conjunto traviesa-sujeción-carril.

Las placas de conglomerantes hidráulicos confieren una fuerte rigidez a la vía que debe corregirse mediante la interposición de elementos elásticos denominados elastómeros entre el carril y la placa. Además, en algunos sistemas de vía en placa se disponen otras capas de elastómeros entre el elemento de apoyo del carril y la placa principal e incluso entre las placas de base y principal, con el objetivo de aumentar la elasticidad del conjunto y disminuir las cargas dinámicas al paso de los vehículos ferroviarios.

Como se comentará posteriormente [2.3. Justificación], en el sistema de vía en placa del que este trabajo de investigación formará parte, se introducirá una placa principal de hormigón donde irán alojados los carriles, además de tres capas bituminosas inferiores que servirán para conferir elasticidad al conjunto, ya que como se ha comentado anteriormente, las placas de conglomerantes hidráulicos confieren una fuerte rigidez a la vía, por lo que

para evitar fracturas ante posibles asientos diferenciales se interponen tres capas bituminosas entre la placa principal de hormigón y la plataforma de suelo estabilizado.

Siguiendo con la definición de los componentes de la vía en placa, decir que sobre las placas principales de hormigón, los carriles pueden ser apoyados de forma directa o mediante traviesas, las cuales pueden introducirse de dos formas: de manera que forme un conjunto monolítico, es decir, hormigonando la placa una vez colocadas las traviesas de forma que éstas queden embebidas en ella, o interponiendo algún elemento elástico entre la placa principal y las traviesas que soportan los carriles. En aquellos sistemas construidos con losas prefabricadas de hormigón se suelen dejar huecos, similares al de los extremos de las traviesas, en las zonas de apoyo y sujeción para asimilarse al sistema embebido que forma conjunto monolítico.

Por último, quedan los elementos de fijación de los carriles a sus respectivos soportes, que conviene que sean sujeciones muy elásticas y con la mayor superficie de contacto posible debido a las grandes cargas dinámicas presentes en este tipo de superestructura. Las sujeciones se clasifican en directas, indirectas o mixtas. En las directas, el carril se encuentra sujeto a la placa principal o al elemento intermedio (traviesa o bloque). En las indirectas, el carril no se sujeta directamente a su apoyo sino que se interpone una placa metálica que aumenta la elasticidad del sistema. En las sujeciones mixtas existe una mezcla de los dos tipos anteriores.

2.2. Características de la Vía en Placa

Con la vía en placa, el transporte ferroviario se abre a nuevas posibilidades, cuyas características consisten en una larga vida útil, velocidad, confort y resistencia.

Tal y como encontramos en [7], el éxito de este sistema se basa en las siguientes ventajas fundamentales:

- Estabilidad, precisión y confort: la vía en placa garantiza un buen asiento de la vía que es estable y duradero. Además soporta grandes cargas gracias a su gran calidad, funcionalidad y seguridad. La precisión en su montaje es la clave del confort durante el viaje y del bajo desgaste de los vehículos.

- Larga vida útil y bajo coste de mantenimiento: se estima que la vida útil de la vía en placa es de 60 años aproximadamente, necesitando muy poco mantenimiento y pocos cuidados. Como se mencionó anteriormente, este sistema provoca un bajo desgaste en los vehículos por lo que baja aún más el mantenimiento tanto de la vía como de los vehículos.

- Aplicación flexible y universal: es un sistema que reduce la altura de construcción por lo que posibilita su empleo en zonas de difícil acceso como pueden ser túneles. Además ofrece un buen asiento independientemente de la irregularidad de la infraestructura, por lo que puede ser utilizado en diferentes tipos de suelo.

- Trazados de vía óptimos: la vía en placa posibilita crear tramos donde la velocidad máxima permitida sea mayor, además de permitir curvas más cerradas y pendientes más pronunciadas lo que lleva a la realización de obras de ingeniería de menor coste.

2.3. Justificación

Este trabajo de investigación se fundamenta en el desarrollo de capas con mezclas bituminosas que contribuyan como parte estructural en la realización de un nuevo sistema de vía en placa para el transporte ferroviario.

Para empezar, se va a describir el esquema del sistema de vía en placa en el que va incluido el paquete de firmes a estudiar. La primera parte que se encuentra en este sistema es una placa de hormigón que irá alojada encima del paquete de firmes mencionado anteriormente, y tendrá como función principal la de servir como soporte a los carriles de la vía ferroviaria. Dichos carriles serán del tipo UIC-60, con ancho de vía internacional para alta velocidad (1435 mm). Los carriles se posarán sobre placas de asiento de 150 mm de ancho y 40 mm de altura con juntas de 20 mm cada dos bloques. Se emplearán unas traviesas bibloque de 212 mm de altura y 660 mm de ancho. La losa de hormigón in situ tendrá un espesor de 300 mm y en su parte inferior se incluirá una manta elastomérica de 12 mm de espesor.

Por debajo del paquete bituminoso, existirá una capa de terreno estabilizado con un espesor de 2000 mm. La categoría de explanada se puede comparar con la E3 según la normativa de carreteras que corresponde con la que ofrece mayores prestaciones. Es lógica esta comparación debido al enorme peso que deberá soportar la explanada durante la circulación del tren. Aun así, esta semejanza no se puede tener en cuenta de manera estricta al utilizar una normativa que no es aplicable a explanadas de ferrocarril.

En la siguiente figura se muestra un esquema de lo que sería el perfil de vía en placa explicado:

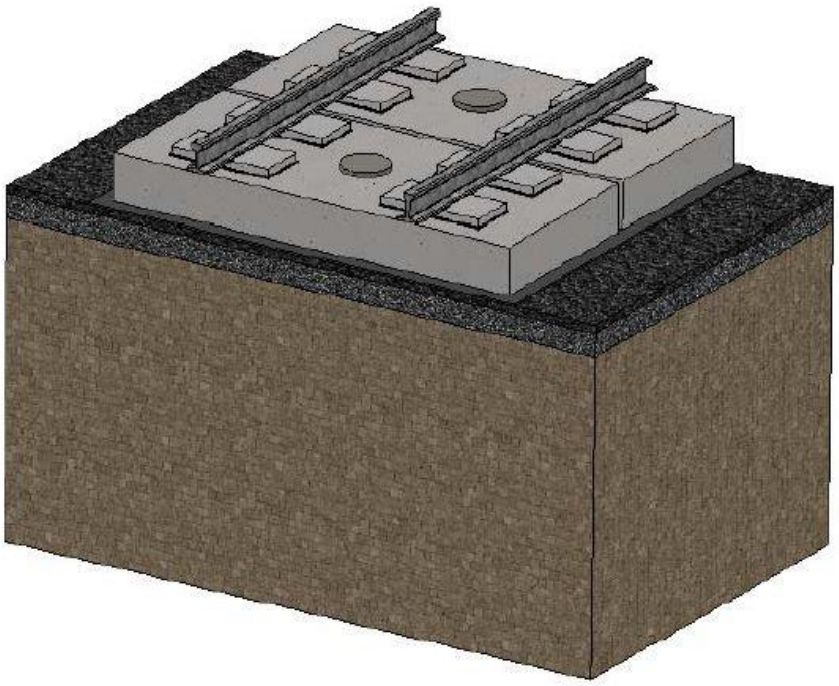


Figura 2.1: Esquema 3D del sistema de vía en placa [34]

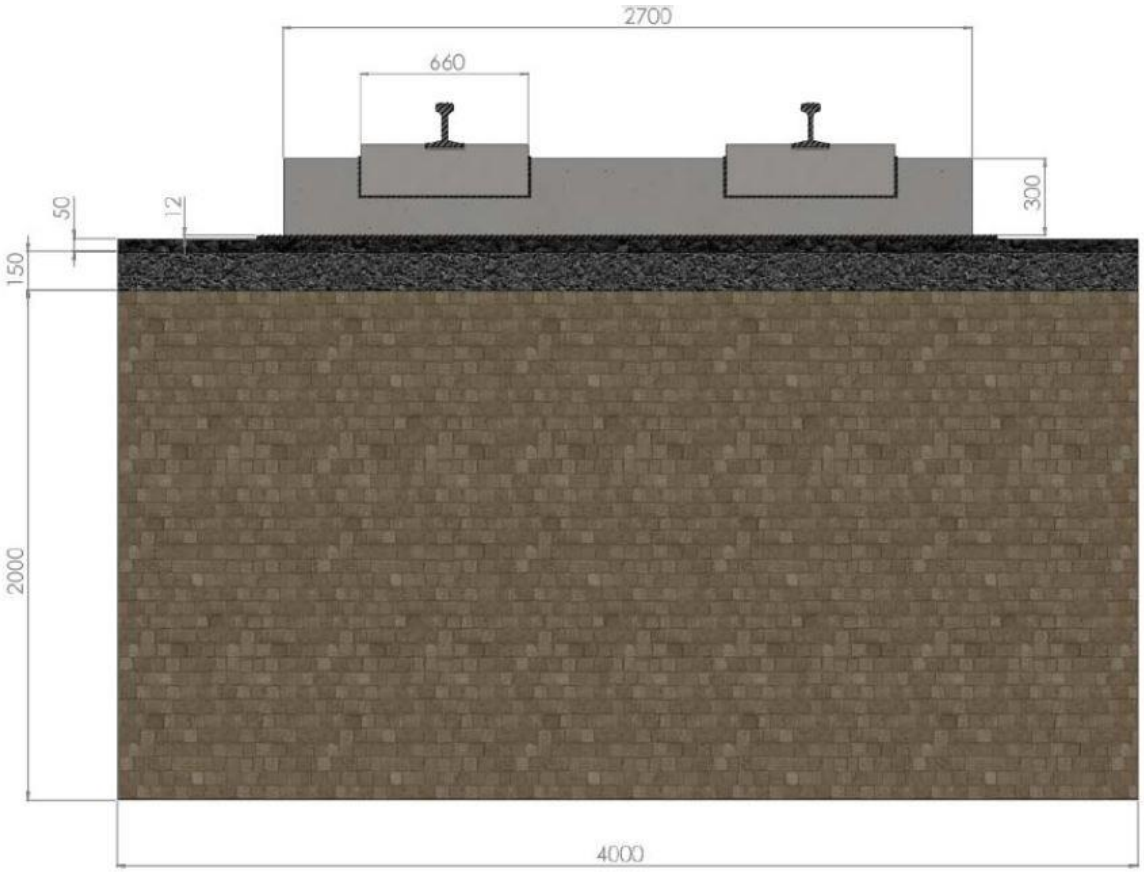


Figura 2.2: Alzado. Esquema del sistema de vía en placa [34]

A la hora de analizar la parte que interesa a este trabajo de investigación, que es la constituida por las capas asfálticas, surgen dudas en la elección del espesor y el tipo de mezcla a emplear.

Para explicar el espesor escogido del paquete de firmes, se ha utilizado la Instrucción de Carreteras, ya que no existe normativa para líneas ferroviarias en ese aspecto, aunque a la hora de la realización de ensayos se debe tener en cuenta que se está en una línea ferroviaria y no en una carretera. El espesor del conjunto del paquete asfáltico se ha considerado en 20 cm entre las tres capas en total. De esos 20 cm, los 5 cm superficiales corresponden a la mezcla SMA 11 y los 15 cm siguientes a la AC 22 S.

Para ofrecer una opción más visual para entender el significado de la elección de 20 cm de espesor del paquete de firmes, se ha optado por realizar una comparación con la Instrucción de Carreteras. Para ello, el criterio seguido ha sido el de utilizar la tabla correspondiente al "Catálogo de secciones de firme, en función de la categoría de tráfico

pesado y la categoría de explanada". El tipo de tráfico que se puede asemejar al del ferrocarril se correspondería con uno de los mayores para el tráfico de carreteras, tales como el T00 y el T0. En cuanto al tipo de explanada se puede asemejar a la que ofrece mejores prestaciones, es decir, la correspondiente a la E3, tal y como se mencionó anteriormente en este apartado. A continuación se muestra la tabla con las posibles secciones de firme que se pueden tomar como referencia a la hora de diseñar el correspondiente paquete de firme objeto de estudio de este trabajo de investigación:

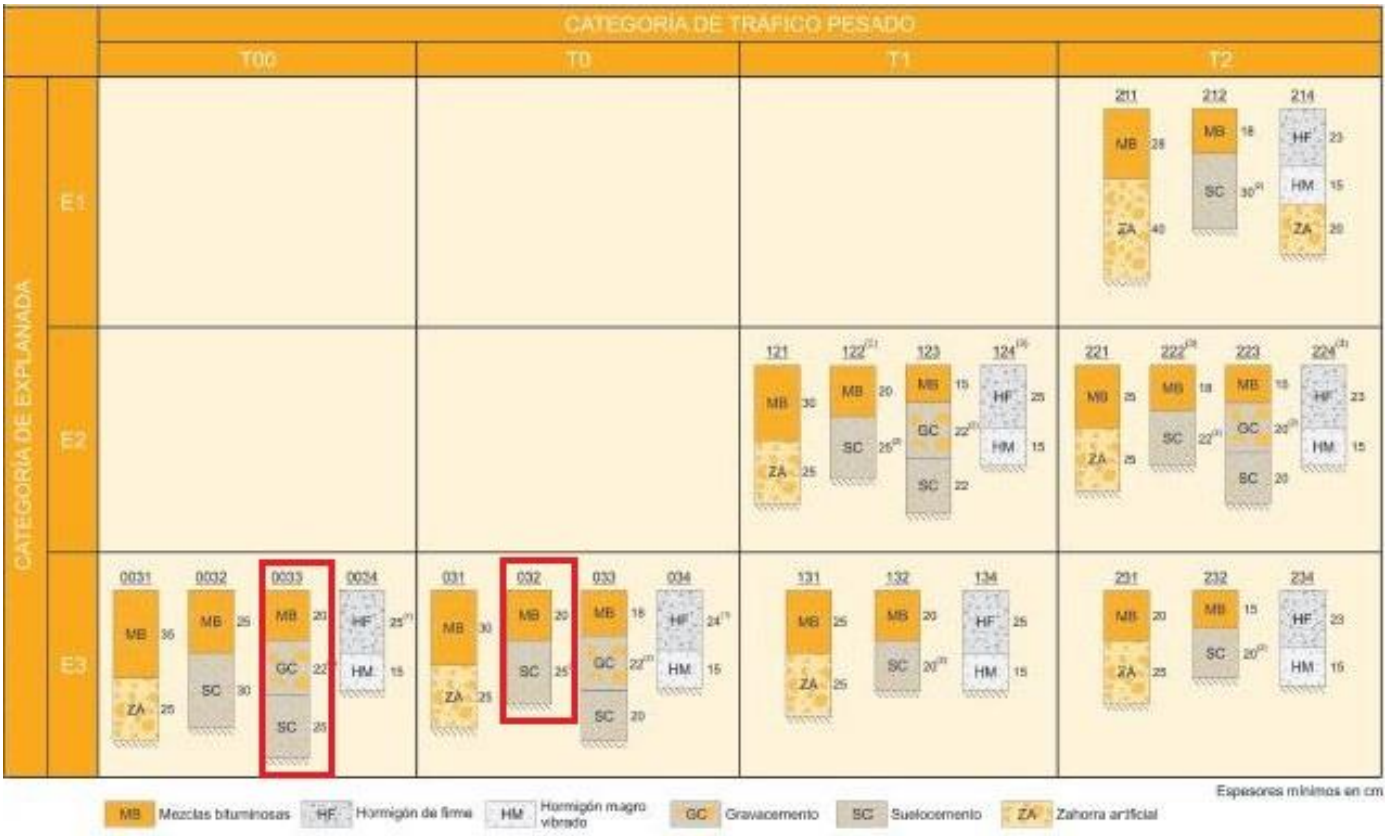


Tabla 2.1: Catálogo de secciones de firme para las categorías de tráfico pesado T00 a T2, en función de la categoría de explanada [37]

Como se puede comprobar por la tabla anterior, las posibles secciones con las que se puede asemejar con el paquete de firmes a estudiar, son la 0033 y la 032, donde el espesor correspondiente a la parte constituida por mezclas bituminosas es de 20 cm.

En cuanto a la elección de las mezclas se ha seguido la Instrucción de Carreteras y el PG-3. En los 15 cm inferiores del paquete de firmes, se ha llegado a la conclusión de la utilización de una mezcla AC 22 S constituida por dos capas de igual espesor (7,5 cm). Con ello se consiguen unas propiedades adecuadas de cara a resistir las solicitaciones a las que va a ser sometida la parte inferior del paquete de firmes (15 cm inferiores). En la mezcla AC 22 S, "AC" indica que la mezcla es de tipo hormigón bituminoso, "22" es el tamaño máximo del árido y "S" indica que el tipo de granulometría corresponde a una mezcla semidensa. Con este tipo de mezcla se va a emplear una tipología muy conocida en España debido a sus numerosas aplicaciones en obras de carretera. Aunque como ya se ha mencionado, las solicitaciones a las que se verá sometido el firme de una línea ferroviaria no son las mismas que a las que se verá sometida una carretera. Pero aun así, se tiene mucha experiencia en este país con este tipo de mezclas aunque no sea en las obras de ferrocarril. Por lo que muchas de las propiedades de la mezcla han sido confirmadas por la práctica a lo largo de los años.

En lo referente a la mezcla elegida para constituir la parte superior corresponde a la SMA, cuyo uso no está demasiado extendido en España donde se utilizan con más frecuencia las BBTM, dejando a las primeras para aplicaciones puntuales como en aeropuertos. En cambio, en el extranjero han sido más utilizadas ya que disponen de una serie de cualidades que las hacen atractivas para su uso. Según [15], las mezclas SMA poseen ciertas propiedades que le confieren una elevada vida útil y resistencia. Entre sus rasgos fundamentales está el alto contenido en ligante y un buen esqueleto mineral, además de una alta proporción de filler, que incluyendo aditivos como la fibra de celulosa, se proporciona un considerable aumento de la durabilidad con respecto a las BBTM. Este aspecto es esencial, porque según se indicó en el apartado [2. Introducción], una de las características de la vía en placa es su escasa necesidad de mantenimiento y su larga vida útil, por lo que resultará primordial el empleo de mezclas bituminosas que gocen de la mayor durabilidad posible, contribuyendo con ello a potenciar las ventajas que ofrece la vía en placa.

Una vez conocida la composición del paquete asfáltico, se procede a ensayar los materiales que van a constituir las distintas mezclas para comprobar que satisfacen los requerimientos impuestos por la normativa. Estos materiales a utilizar, tendrán ciertas peculiaridades que condicionarán su uso y que deberán cumplir una serie de

requerimientos impuestos en la normativa de cada mezcla, y que vendrán en el apartado [5.2.5. Mezclas asfálticas].

2.4. Proceso y calendario de investigación

Para la obtención de los resultados de las mezclas bituminosas, se ha procedido en primer lugar a la realización de los ensayos de los áridos correspondientes a los desechos de escombrera suministrados al Laboratorio de Resistencia de Materiales de la Escuela Politécnica Superior de Linares [5.2.1. Áridos]. Se comenzaron a realizar los ensayos a finales de Octubre de 2013 con los equipos disponibles en el Laboratorio de Materiales [5.4. Equipos utilizados]. Siguiendo la metodología de investigación que será desarrollada posteriormente en el apartado [5.1. Metodología empleada], se fueron desechando aquellos áridos que no cumplían con la normativa aplicable a los áridos de firmes [7. Conclusiones y futuras líneas de investigación].

En Noviembre de 2013 fueron recibidos los distintos fillers, correspondientes a desechos denominados lodos de corte [5.2.2. Filler]. La metodología de trabajo para filler expuesta en [5.1. Metodología empleada] tiene semejanza con la de los áridos, donde se han ensayado los distintos fillers y se han ido desechando o escogiendo los más adecuados dependiendo de si los resultados eran favorables a los márgenes impuestos por la normativa de firmes [7. Conclusiones y futuras líneas de investigación].

Los diferentes ensayos de los áridos y de los fillers duraron hasta Febrero de 2014 donde se sacaron las conclusiones necesarias para la elección del árido y del filler más adecuado. Además, surgió la necesidad de la inclusión de áridos de mayor calidad para proceder a su mezcla con los desechos ya que éstos por sí solos no cumplían con las especificaciones impuestas por la normativa de firmes. Todo esto será desarrollado posteriormente en el apartado [7. Conclusiones y futuras líneas de investigación].

Tras la obtención de los resultados del árido y del filler, se procede a la recepción de los betunes [5.3.3. Betunes] además de los aditivos necesarios [5.3.4. Aditivos] en Marzo de 2014, por lo que comienzan los ensayos con las probetas de mezclas bituminosas. Durante la investigación de dichas probetas se tuvo la colaboración de un laboratorio de

Corvisa. Además, aquellos ensayos realizados en Linares fueron en el nuevo Laboratorio de Materiales situado en el Campus Científico Tecnológico de Linares.

Por último, también se ha recibido colaboración de distintos laboratorios tanto de la Universidad de Jaén como de la Universidad de Granada. La finalización de los ensayos de este trabajo de investigación tuvo lugar en Mayo de 2014.

A continuación se muestra el Diagrama de Gantt de los ensayos de laboratorio realizados a lo largo del proyecto:

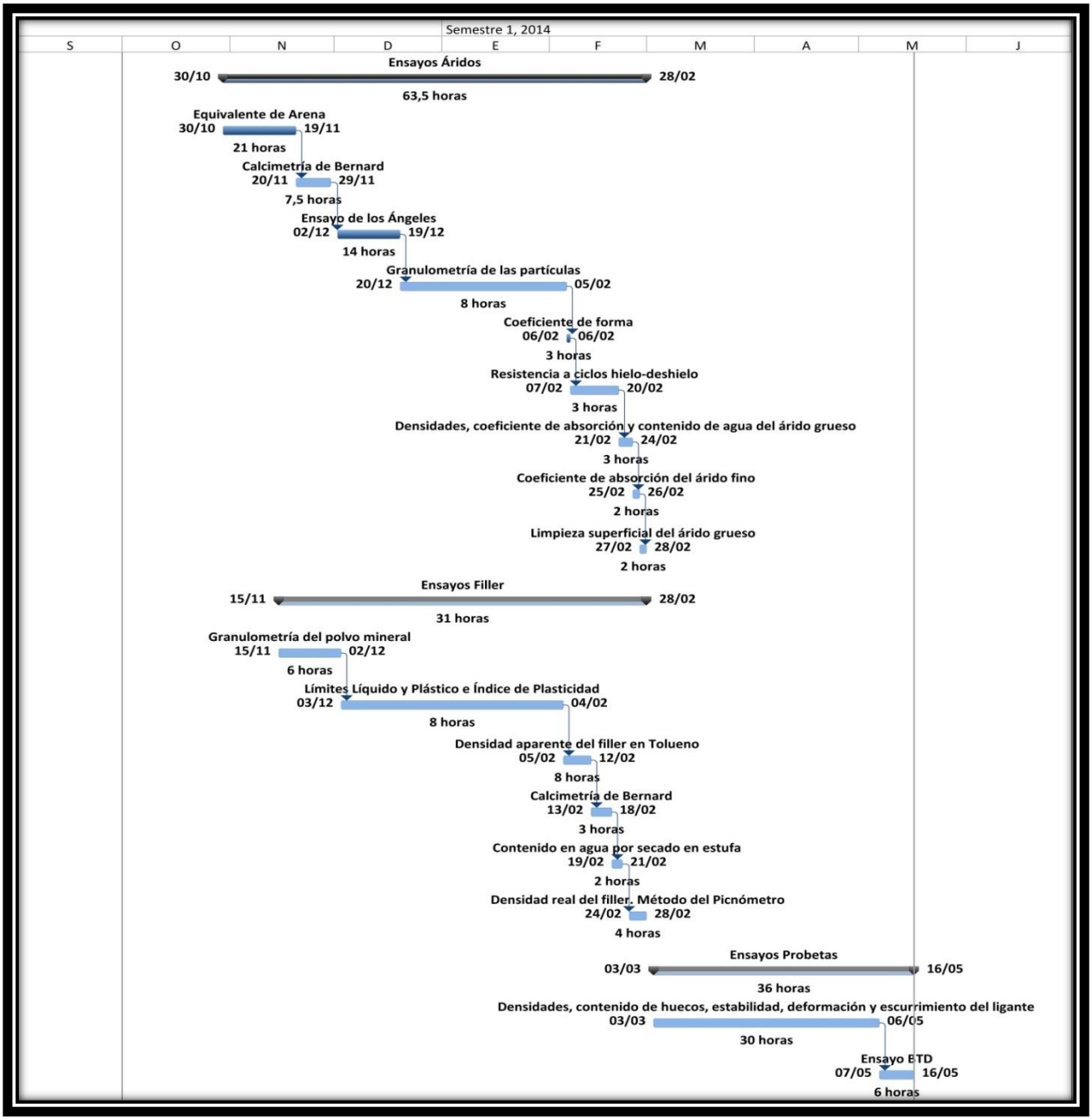


Figura 2.3: Diagrama de Gantt de los ensayos de laboratorio del proyecto

En dicho diagrama se muestran todos los ensayos en el orden en el que fueron realizados. Hay que aclarar que la duración en horas de cada ensayo así como los días entre los que se llevaron a cabo es a modo orientativo, ya que en numerosas ocasiones hubo que repetir ciertas tareas al obtener resultados no concluyentes o erróneos.

Cada ensayo se representa con una barra azul cuya longitud es proporcional a su duración en días. Encima de cada barra se encuentra el nombre de la tarea, debajo el trabajo en horas aproximadas que supone el ensayo y a la izquierda y a la derecha la fecha de inicio y de fin respectivamente. Existen tres divisiones correspondientes a los ensayos de los áridos, de los filler y de las probetas. Por último, en la parte superior del diagrama existe una regla que se divide en meses y que sitúa al proyecto en el espacio de tiempo en el que fue realizado (2013 – 2014).

El Diagrama de Gantt se hizo con Microsoft Project 2010, por lo que para visualizarlo hay que disponer de ese programa con la versión 2010 o superior. Para abrirlo hacer clic aquí.

En el caso de no disponer de dicho programa, se puede visualizar igualmente el Diagrama de Gantt en formato PDF haciendo clic aquí.

3. Objetivos

Este Trabajo de Fin de Grado tiene como finalidad la investigación y desarrollo de un paquete de firmes, constituido por mezclas resistentes y con una mayor durabilidad, que sustituya al balasto en un nuevo sistema de vía en placa.

Para la fabricación de dicho paquete de firmes se optará por inclusión de la mayor cantidad de residuos posible. Por ello se va a llevar a cabo el estudio del comportamiento de cada uno de los materiales por separado para corroborar su empleo. Dichos residuos, objetivos de investigación, serán desechos de áridos procedentes de escombrera [5.2.1. Áridos], así como lodos de corte procedentes del proceso de corte y pulido del mármol [5.2.2. Filler]. Además, se estudiará cada una de las mezclas bituminosas que compondrán el definitivo paquete de firmes para, del mismo modo, comprobar que cumplen con la normativa.

La legislación utilizable en este trabajo será la relacionada con los firmes de carreteras debido a la inexistencia actual de normativa aplicable en relación a firmes en las líneas de ferrocarril. Por ello en el desarrollo de la investigación del trabajo habrá que tener un especial cuidado en este aspecto para no crear confusiones ya que la legislación de carreteras a emplear será utilizada a modo de guía y no como normativa en sí misma, debido a la gran diferencia existente entre el firme de carretera y el paquete de firmes en una línea ferroviaria.

De esta forma, con el desarrollo de este trabajo, se busca asegurar la correcta funcionalidad del paquete de firmes dentro del nuevo sistema de vía en placa. Por consiguiente, se buscará realizar un estudio tanto físico como químico de los materiales que se van a utilizar para evaluar sus propiedades y llegar a la conclusión de si son aptos, cumpliendo con los requisitos de alta durabilidad que serán exigidos, ya que una de las características de la vía en placa es su escasa necesidad de mantenimiento a lo largo de gran parte de su vida útil [2.2. Características de la Vía en Placa].

Para la inclusión de los distintos residuos en el paquete de firmes es fundamental tener en cuenta una serie de aspectos que van a derivar en la deducción de las características del firme:

- Propiedades físicas y químicas. Es necesario conocerlas ya que con ellas se va a deducir la afinidad y buen comportamiento de los distintos materiales actuando dentro de un conjunto.

- Durabilidad de las mezclas bituminosas. Resulta primordial evaluar las distintas mezclas que componen el paquete de firmes en relación a su envejecimiento, teniendo en cuenta los agentes agresivos externos a los que pueden verse sometidos los distintos materiales.

- Composición de la mezcla. Se podrá variar la cantidad de cada componente, buscando la utilización del mayor porcentaje de residuos, pero cumpliendo al mismo tiempo con el buen funcionamiento del firme.

Con el estudio de dichos aspectos se busca conseguir un nuevo material que funcione como firme y con la inclusión del mayor contenido de residuo posible, favoreciendo con ello la mejora de las condiciones ambientales, pero basándose en aspectos técnicos. Con ello se procura afianzar un nuevo material en la obra de la ingeniería civil.

En cuanto a la elección del grosor del paquete de firmes, se ha optado por aquel que cumpliendo con las exigencias técnicas sea el más económico posible. Además, con la adición de residuos como materiales constituyentes, se ha considerado el factor medioambiental como uno muy importante a la hora de tomar la decisión más acertada. Por tanto, se han tenido en cuenta consideraciones técnicas, económicas y medioambientales para la elección no sólo del grosor del paquete, sino también del grosor de las diferentes capas que conformarán dicho paquete, además de las mezclas bituminosas que formarán cada una de las capas.

Con la utilización de residuos se consiguen numerosos beneficios los cuales se mencionan a continuación:

- Reducción del coste económico de los nuevos proyectos de vía en placa, los cuáles son muy costosos en comparación con los tradicionales sistemas de vía sobre balasto [2. Introducción]. Con ello se consigue aumentar la competitividad de la vía en placa ya que el factor económico es muy condicionante en las construcciones civiles.

- Con la utilización de residuos se disminuye considerablemente el volumen de desechos destinados a vertederos.
- Reducción del consumo de áridos de cantera.
- Al aminorar el empleo de áridos de cantera y aumentar el uso de residuos se consigue acortar el gasto de energía, ya que se está reciclando material.
- Colaboración con el medio ambiente a reducir el impacto que provocan las grandes obras civiles, gracias al reciclaje de material así como de la reducción de consumo de energía.
- Mejora de la opinión pública a la hora de acometer obras de gran envergadura, ya que se invierte en el desarrollo de materiales sostenibles.
- Contribuir en el desarrollo de las construcciones civiles en España, que podrá exportar nuevos materiales, consiguiendo con ello elevar la rivalidad con otros países por ser pionero en este tipo de obras.

Una vez han sido citados los diferentes beneficios que se obtienen en la vía en placa con la realización de este trabajo, se puede deducir que se busca un conjunto de objetivos técnicos, económicos, medio ambientales y estratégicos que se van a desarrollar con mayor detalle a continuación:

3.1. Objetivos técnicos

Dentro de este apartado, el presente trabajo de investigación tiene como objetivo fundamental la creación de un nuevo material, incluyendo residuos, que se adecúe para el empleo en un paquete de firme que cumpla con los requerimientos de la vía en placa.

Con ello se persigue la creación de pautas para su posterior empleo en las mezclas bituminosas. Ya que como ya se ha mencionado anteriormente, no existe normativa específica para firmes en líneas ferroviarias, por lo que con esta investigación se contribuirá en ese aspecto. Además, se logrará un avance tecnológico en el desarrollo de materiales que estén formados por residuos.

3.2. Objetivos económicos

Las construcciones civiles de gran envergadura como son el caso de las líneas de ferrocarril, suelen venir asociadas a un gran presupuesto. Por lo tanto es esencial tener en cuenta el factor económico para acometer este tipo de obras.

Con la utilización de material reciclado se procura disminuir el coste total del proyecto además de abrir un nuevo mercado consistente en la comercialización de materiales que anteriormente tan sólo se almacenaban en vertederos al ser considerados residuos.

Además, el reciclaje de material permite a las empresas ahorrarse gran parte de los gastos relacionados con el coste del transporte de los residuos a lugares autorizados para su almacenaje.

3.3. Objetivos medioambientales

La extracción de áridos de canteras es un proceso costoso además de poco respetuoso con el medio ambiente debido a la alteración del paisaje y de la gran cantidad de energía necesaria para llevar a cabo dicha extracción.

Con la utilización de residuos se conseguirá reducir de manera notable la energía necesaria para la obtención de material adecuado para la construcción. Además, se reducirá el consumo de árido de cantera y por tanto se ayudará a conservar en mayor medida ciertos lugares.

También, uno de los objetivos ambientales que se busca consiste en la reducción del volumen de material desechable, logrando con ello evitar el llenado así como la apertura de nuevos vertederos que alberguen dichos residuos.

3.4. Objetivos estratégicos

Con la investigación en el reciclaje de material de construcción se abre un nuevo mercado que condicionará la creación de nuevos puestos de empleo. Los residuos pasarán a un plano más protagonista ya que tendrán utilidades en la construcción. Se procurará estudiar todo lo posible en este aspecto para determinar qué residuos pueden ser reciclados y cuáles necesitan de un tratamiento previo a su empleo.

Las empresas españolas dedicadas a la construcción de vía en placa progresarán en el avance tecnológico del reciclaje, lo que las condicionará para elevar su competitividad respecto a empresas extranjeras. Por lo que partirán con cierta ventaja económica a la hora de acometer nuevos proyectos de ferrocarril. Además, tendrán una mejor opinión pública debido al compromiso con el medio ambiente.

En cuanto a la legislación, este estudio contribuirá a que se tengan en cuenta nuevos materiales en la construcción. Por lo que se aportarán resultados fiables para la creación de nueva normativa que defina unos rangos entre los que se pueda elegir el tipo de residuo y los porcentajes que se pueden utilizar en el futuro. Pero este trabajo de investigación sólo servirá como un pequeño aporte para que con el tiempo se puedan tener en cuenta los resultados obtenidos, ya que tan solo se centrará en el desarrollo del paquete de firmes exigido.

4. Estado del arte de las patentes de Vía en Placa existentes

Llegados a este punto, queda claro que la investigación de este trabajo se centra en la creación de un paquete de firmes para un nuevo sistema de vía en placa. Por ese motivo, resulta conveniente comprender las patentes existentes, en la actualidad, de este método constructivo. Con ello se conocerá su evolución histórica y, de manera general, los diferentes modelos puestos en práctica en otros países.

Los inicios de la evolución de la vía en placa han estado estrechamente relacionados con la profunda investigación que ha hecho Japón de este sistema constructivo para líneas de alta velocidad. Este país llegó a la conclusión de que el elevado coste de mantenimiento que requerían las tradicionales vías con balasto hacía viable la búsqueda de un método para hacer las infraestructuras ferroviarias más duraderas y ello llevó a la vía en placa. De esta forma, se han realizado numerosos estudios y ensayos que han ido transformando la red ferroviaria de alta velocidad de este país.

En cambio, en Europa se tardó más tiempo en introducir el nuevo sistema. Esta tardanza estuvo condicionada principalmente por el elevado coste que suponían este tipo de construcciones y la desconfianza hacia este nuevo sistema debido al desconocimiento al tratarse de un método novedoso. Aun así, se construyeron diversos tramos de longitud reducida a modo de prueba, siendo Alemania el país que más esfuerzos dedicó en la vía en placa en toda Europa.

Cuando se comenzó a introducir la alta velocidad en los años ochenta a modo general, se empezó a observar una elevada y rápida degradación del balasto, como la aparición de innumerables lugares vacíos provocados por la pulverización de éste en zonas que se acusaba el desgaste de la vía, lo que ocasionaba un elevado coste de mantenimiento. Por tanto, se comenzó a ver la vía en placa como una nueva forma de construcción viable de cara a aumentar la durabilidad de las infraestructuras.

Existen otras ventajas de la vía en placa. En primer lugar, el aumento de tramos de túneles y viaductos donde se facilita mucho la construcción con este nuevo sistema. Por otra parte, la posibilidad de usar este método en otro tipo de transporte además de la alta

velocidad, como pueden ser las infraestructuras de metro, tranvía o transporte urbano de ferrocarril, lo que ha hecho ampliar el abanico de aplicaciones de esta tipología de vía.

Actualmente, los países pioneros en la investigación de la vía en placa son Japón y Alemania. Los estudios realizados hasta la fecha se han centrado principalmente en la valoración de la viabilidad económica del uso de este nuevo sistema constructivo, ya que el factor económico ha sido siempre el más restrictivo.

Existen por tanto, numerosos estudios en la actualidad que demuestran la rentabilidad en términos de vida útil y de coste de mantenimiento, lo que propicia la aparición de numerosos modelos y sistemas de vía en placa que buscan ser competitivos en el mercado. Entre los tipos más destacados se tiene los que a continuación se mencionan:

<table>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">CLASIFICACIÓN DE LA VÍA EN PLACA</td><td colspan="5">Familias</td></tr>
<tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Características estructurales

Niveles Elásticos</td><td>Sistema de sujeción</td><td>Continuo</td><td colspan="4">Discreto</td></tr>
<tr><td>Posicionamiento del carril</td><td colspan="2">Hilos de carril independientes</td><td colspan="3">Posicionamiento y nivelación del carril mediante elementos prefabricados</td></tr>
<tr><td>Elementos reemplazables</td><td>No lleva</td><td>Puede llevar bloque simple</td><td colspan="2">Con traviesas</td><td>Con losas</td></tr>
<tr><td>Método constructivo</td><td>Vertido de resina in situ</td><td>Apoyo del carril sin traviesas</td><td>Traviesas incrustadas en hormigón</td><td>Traviesas apoyadas sobre estructura soporte</td><td>Losas dispuestas sobre placa</td></tr>
<tr><td rowspan="2">1 nivel elástico</td><td rowspan="2">A</td><td>Carril embebido</td><td>Apoyo directo del carril</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr>
<tr><td>EDILON</td><td>PACT</td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="2">2 niveles elásticos sin bloque intermedio</td><td rowspan="2">B</td><td>-</td><td>Apoyo indirecto del carril</td><td>Monolítica con traviesas</td><td>Traviesas apoyadas sobre losas</td><td>Losa apoyada con mortero no elástico</td></tr>
<tr><td></td><td>Züblin BTE
Heilit W.BES
APPITRACK
CrailsheimFCC
Rasengleis
Hochtief/SM</td><td>RHEDA
RHEDA Berlín
RHEDA 2000
HEITKAMP
ZÜBLIN</td><td>BTD
ATD
GETRAC
WALTER
SATO</td><td>BÔGL</td></tr>
<tr><td rowspan="2">≥ 2 niveles elásticos con bloque intermedio</td><td rowspan="2">C</td><td>-</td><td>Bloques recubiertos de elastómero</td><td>Traviesas recubiertas de elastómero</td><td>Losa flotante con traviesas</td><td>Losa flotante sin traviesas</td></tr>
<tr><td></td><td>NS Blokkenspoor
SONNEVILLE
Bloques EDILON
Bloques TRANOSA</td><td>STEDEF
SATEBA</td><td>Mantas CDM</td><td>Losa flot. TRANOSA
Losa flot. GERB
JNR
ÖBB-PORR
IPA</td></tr>
</table>

Tabla 4.1: Clasificación de los sistemas comerciales de vía en placa más habituales [1]

De los modelos mencionados anteriormente se van a exponer en la siguiente tabla las cualidades que diferencian a cada sistema de vía en placa:

TIPO DE VÍA	TÚNELES	RUIDO	VIBRACIONES	MANTENIMIENTO
Carril embebido	Menor sección Fácil evacuación	Necesidad de soluciones extras	Buen comportamiento	Muy dilatada en el tiempo
Apoyo directo	Dificultad de evacuación	Mal comportamiento	Mal comportamiento	Muy frecuente en el tiempo
Apoyo indirecto	Dificultad de evacuación	Mal comportamiento	Necesidad de soluciones extras	Muy frecuente en el tiempo
Bloques recubiertos con elastómeros	Dificultad de evacuación	Necesidad de soluciones extras	Buen comportamiento	Problemas con las filtraciones de agua
Monolítico con traviesas	Facilidad de evacuación	Necesidad de soluciones extras	Necesidad de soluciones extras	Posible reemplace de elementos
Traviesas recubiertas de elastómero	Dificultad de evacuación	Necesidad de soluciones extras	Buen comportamiento	Problemas con las filtraciones de agua
Traviesas sobre losa	Humos en caso de incendio	Necesidad de soluciones extras	Necesidad de soluciones extras	Posible reemplace de elementos
Losa flotante con traviesas	Mucha sección	Necesidad de soluciones extras	Buen comportamiento	Posible reemplace de elementos
Losa sobre mortero no elástico	Facilidad de evacuación	Necesidad de soluciones extras	Necesidad de soluciones extras	Posible reemplace de elementos
Losa flotante sin traviesas	Facilidad de evacuación	Necesidad de soluciones extras	Buen comportamiento	Posible reemplace de elementos

Tabla 4.2: Comportamiento de los distintos tipos de vía en placa [1]

Como se ha mencionado anteriormente en el apartado [2.1. Componentes de la Vía en Placa], los diferentes sistemas de vía en placa existentes, independientemente de los materiales empleados, tendrán cierta similitud en su estructura constructiva. Aun así, cada tipología de este sistema dispone de distintas características específicas, que van a condicionar un comportamiento diferente frente a los requerimientos a los que serán expuestos. Por ello, cada modelo tendrá un campo de aplicación determinado.

5. Materiales y métodos

5.1. Metodología empleada

La metodología empleada para la obtención de los resultados de las probetas bituminosas ha consistido, en primer lugar en el análisis de los áridos, consistentes en desechos de escombrera, siguiendo la norma UNE 146130 donde se exponen los ensayos a realizar y sus resultados óptimos para su empleo en mezclas bituminosas. Conforme avanzaban los ensayos se han ido descartando áridos debido a que no cumplen con las especificaciones impuestas por el PG-3 para la mezcla AC-22-S y por la norma UNE-EN 13108-5 para la mezcla SMA-11. El empleo del PG-3 para la línea ferroviaria fue justificado anteriormente en el apartado [2.3. Justificación], y es por el motivo de no existir normativa de firmes para su empleo en las líneas ferroviarias en la actualidad.

Posteriormente se ha llevado a cabo el análisis del filler suministrado, consistente en lodos de corte, comprobando con ello, al igual que con los áridos, que cumplen con los requisitos necesarios para su empleo en las mezclas.

Una vez elegido el árido más adecuado, junto con el filler y el betún, se fabrican las probetas para su posterior ensayo, variando el porcentaje de ligante/betún que se le añade a la mezcla para así determinar qué proporción se adecúa de mejor manera, cumpliendo con las exigencias que impone la normativa, antes mencionada. Con todo ello, realizando los ensayos correspondientes a las probetas ya fabricadas, quedan finalmente determinadas las características de la mezcla bituminosa creada.

En cuanto a la metodología de trabajo seguida consiste en la recepción y almacenamiento de los materiales suministrados, para su posterior ensayo en el Laboratorio de Resistencia de Materiales de la Escuela Politécnica Superior de Linares, empleando los diferentes equipos necesarios para la toma de resultados, siguiendo con la normativa vigente en cada ensayo.

5.2. Materiales

A continuación se indicarán los distintos materiales, con sus respectivas características, ensayados y analizados en este proyecto.

5.2.1. Áridos

Los desechos de áridos suministrados han sido obtenidos de una escombrera privada dentro una cantera localizada en Almería y se corresponden a áridos de machaqueo de tipo calizo tal y como posteriormente reflejarán los resultados de su análisis [6.2. Resultados Calcimetría de Bernard (áridos)]. Son los siguientes (los códigos que acompañan al nombre de cada árido fue proporcionado por la empresa y hacen referencia al lugar del que fueron extraídos):

- Gran Parada (131023-1-1): este árido fue utilizado en un principio para estudiarlo en una posible utilización en la fabricación de cementos, aun usándolo en pequeñas cantidades, así como para la formulación de un nuevo cemento siempre que las características de los mismos lo permita.
- Rambla Orica (131023-2-1; 131023-2-2): otro tipo de árido ensayado para su utilización en alguna capa de mezcla bituminosa de la vía en placa.
- J. Abarca (131023-3-1; 131023-3-2): se trata de residuos de cantera a los que se les buscará dar una salida útil, ya sea como capa base, zahorra o labores de reparación como bacheo, siempre que los ensayos realizados así lo permitan.
- Aleros Oscuros (131120-4-1) y Aleros Amarillos (131120-4-2): estos áridos fueron enviados posteriormente como alternativa a los anteriores aunque sus resultados no han sido del todo satisfactorios.

5.2.2. Filler

El filler es parte fundamental de la mezcla bituminosa debido a que se asocia con el ligante bituminoso para formar una capa que rodea las partículas del árido dando estabilidad al conjunto. Como bien es sabido, una alta proporción de betún en la mezcla puede ocasionar un elevado escurrimiento. Al ser una de las mezclas la SMA11, es necesario emplear un alto contenido en ligante, tal y como se comentó en [2.3. Justificación]. Además, según [15] y tal como se expondrá posteriormente en el apartado [6.16] correspondiente a los resultados de las probetas de la mezcla SMA11, el resultado de máximo escurrimiento permitido corresponde al 0,3%. Por tanto, para evitar superar este porcentaje es recomendable utilizar un filler con unas características adecuadas de adhesividad. Otra función fundamental de este componente es que rellena los vacíos existentes en el conjunto dotando de impermeabilidad y densificación a la mezcla bituminosa.

Este filler está formado por lodos de corte, un elemento muy contaminante para el Medio Ambiente. Procede del proceso de corte y pulido del mármol que genera un lodo fino con textura franco arcillosa, constituido casi exclusivamente por carbonatos (en el ensayo del Calcímetro de Bernard se demostrará esta composición predominantemente caliza [6.13. Resultados Calcimetría de Bernard (fillers)]) y pH alcalino, según [35].

A continuación se muestran los dos fillers ensayados. Van acompañados de un código correspondiente al lugar del que fueron extraídos:

- Filler A (111014-2-6). Filler calizo procedente de Macael (Almería).
- Filler B (131029-20-1). Filler calizo procedente de Macael (Almería).

5.2.3. Betunes

El ligante bituminoso es el principal componente de la mezcla bituminosa ya que es el que aglomera los áridos y da cohesión y estabilidad a la mezcla. En este trabajo se ha tratado con los siguientes betunes, tal y como se mencionó en el apartado [2.3. Justificación]:

- Betún 30/50 procedente de B.P.
- Betún 50/70 procedente de B.P.

5.2.4. Aditivos

Como aditivo se ha utilizado la fibra de celulosa para crear las mezclas SMA11. Las fibras de celulosa basan su funcionamiento como estabilizante para prevenir el escurrimiento del betún y su reparto uniforme con el fin de conseguir la formación de una película gruesa y homogénea alrededor de los áridos en mezclas cuyo contenido en ligante es superior a lo que la superficie específica de los mismos puede admitir.

Figura 5.1: Fibras de celulosa

5.2.5. Mezclas Bituminosas

Tras el análisis de los materiales mencionados anteriormente y conocidas sus características, se puede pasar a realizar la mezcla bituminosa buscada. Son dos las mezclas que se van a ensayar y han sido mencionadas y justificadas en el apartado [2.3. Justificación] de este trabajo.

- **Mezcla SMA 11:** será la destinada a la construcción de la capa que irá colocada debajo de la placa de hormigón y encima de las otras dos capas de mezcla bituminosa (ver 2.3. Justificación). Constituirá la capa más fina que formará el firme, por lo que la mezcla será de mayor calidad. Su función principal será la de soportar las mayores cargas que va a provocar el tráfico ferroviario y que van a ser transmitidas por la placa de hormigón. Además tendrá la función de dar elasticidad al sistema de vía en placa, según se mencionó anteriormente en el apartado [2.3. Justificación]. Tal y como aparece en [15], los materiales más utilizados en este tipo de mezclas son:

    - Áridos de naturaleza ofita y caliza.
    - Filler de aportación carbonato cálcico y filler calizo.
    - Betunes 30/50 convencional y betún modificado con polímeros tipo PMB 45/80-65.
    - Aditivos: Fibras de celulosa.

Figura 5.2: Árido, filler y fibra de la mezcla SMA 11

Siguiendo los límites descritos en la norma UNE EN 13108-5 se construye la composición y rango de posibles curvas granulométricas adecuadas para este tipo de mezcla:

Tamiz (mm)	Límite superior	Límite inferior
16	100	100
11,2	100	90
8	80	55
4	33	22
2	30	20
0,5	20	12
0,063	10	6

Tabla 5.1: Huso granulométrico para la mezcla SMA11 [15]

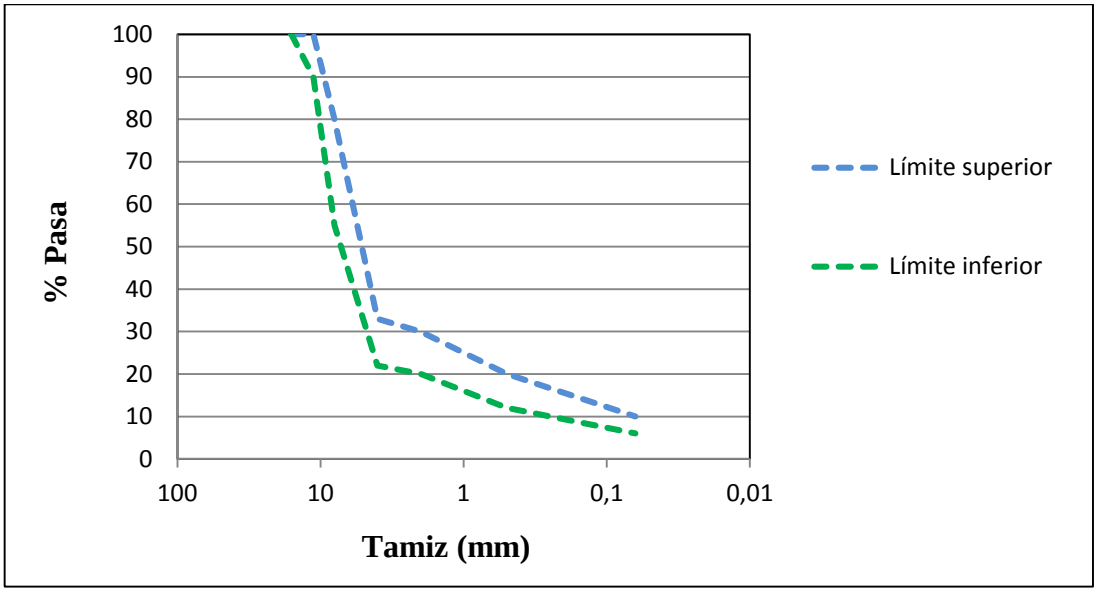


Figura 5.3: Huso granulométrico para la mezcla SMA11 [15]

ENSAYOS	NORMAS DE ENSAYOS
Granulometría	UNE EN 12697-2
Preparación probetas	UNE EN 12697-30
Escurrimiento (%)	UNE EN 12697-18
Dens. Máxima (Kg/m^3)	UNE EN 12697-5
Dens. Aparente (Kg/m^3)	UNE EN 12697-6
Huecos mezcla (%)	UNE EN 12697-8
Huecos rellenos (%)	UNE EN 12697-8
Huecos áridos (%)	UNE EN 12697-8

Tabla 5.2: Ensayos a realizar a la mezcla SMA11

- **Mezcla AC 22 S (S-20):** Esta mezcla bituminosa tiene unas propiedades de resistencia y durabilidad menor a las de la mezcla anterior. Por ello, el grueso que formará será de mayor espesor y su función principal será la de distribuir las cargas transmitidas por la capa bituminosa superior al terreno natural, siguiendo el esquema de vía en placa expuesto en el apartado [2.3. Justificación].

Figura 5.4: Árido y filler de la mezcla AC 22 S

Siguiendo los límites descritos en la norma UNE EN 13108-1 se construye la composición y rango de las posibles curvas granulométricas adecuadas para este tipo de mezcla:

Tamiz	Límite superior	Límite inferior
31,5	100	100
22,4	100	90
16	88	70
8	66	50
4	50	35
2	38	24
0,5	21	11
0,25	15	7
0,063	7	3

Tabla 5.3: Curva granulométrica y huso para la mezcla AC 22 S (S-20) [19]

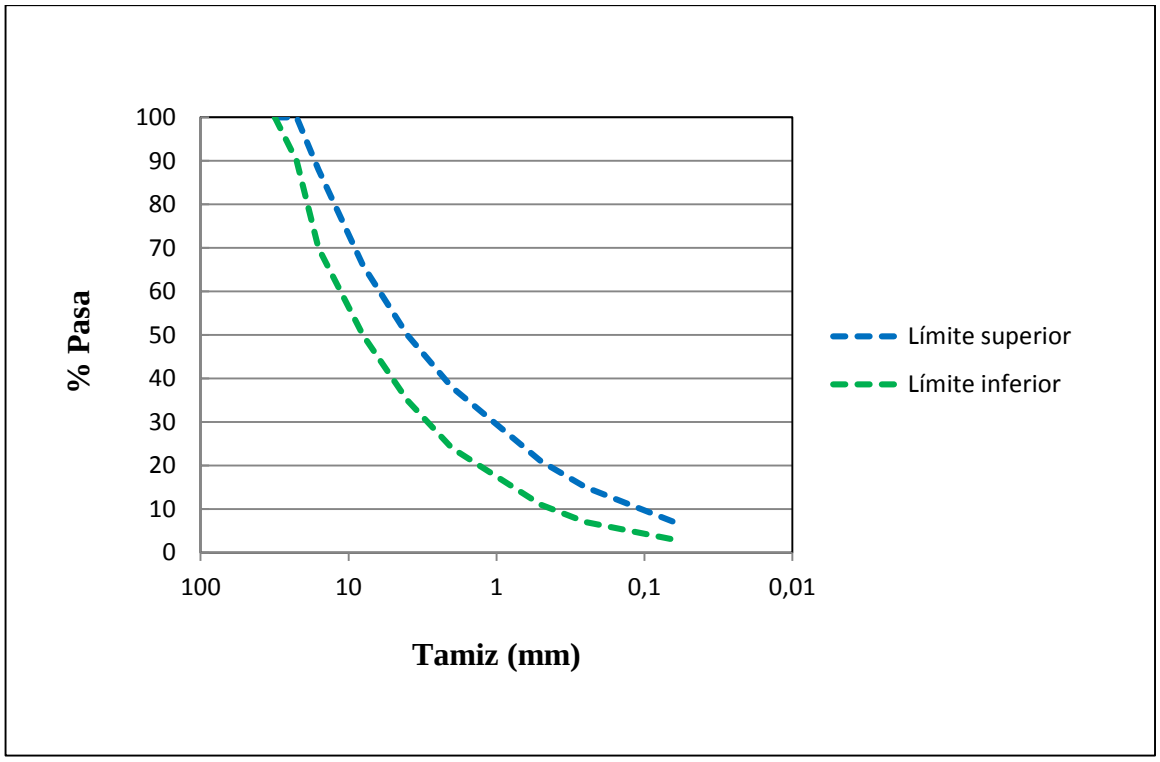


Figura 5.5: Huso granulométrico para la mezcla AC 22 S (S-20) [19]

ENSAYOS	NORMAS DE ENSAYOS
Granulometría	UNE EN 12697-2
Preparación probetas	UNE EN 12697-30
Dens. Máxima (Kg/m^3)	UNE EN 12697-5
Dens. Aparente (Kg/m^3)	UNE EN 12697-6
Huecos mezcla (%)	UNE EN 12697-8
Huecos rellenos (%)	UNE EN 12697-8
Huecos áridos (%)	UNE EN 12697-8

Tabla 5.4: Ensayos a realizar a la mezcla AC 22 S (S-20)

5.2.6. Riegos Bituminosos

En la construcción del paquete de firmes, es necesario el empleo de riegos bituminosos, ya que como se ha comentado anteriormente [2.3. Justificación], el conjunto del firme a construir estará formado por tres capas (la superior constituida de SMA 11 y las dos

inferiores constituidas de AC22S), por lo que para conseguir que dichas capas se comporten como un conjunto uniforme se deben aplicar riegos de adherencia. Del mismo modo, para lograr una correcta unión del firme con el suelo estabilizado, se procede a la aplicación de un tratamiento con un riego de imprimación. Por último, para dotar al paquete de impermeabilidad, se le puede suministrar un tratamiento consistente en riegos de curado.

No se profundizará más en este tema debido a que en este trabajo de investigación no se utilizan los riegos bituminosos. Aun así, es conveniente saber cuántos hay y sus aplicaciones, por lo que según el capítulo 3, parte 5 del PG-3, existen tres tipos de riegos bituminosos que ya han sido citados anteriormente y que ahora se procederá a su breve definición:

- Riegos de Imprimación: Según el artículo 530 del PG-3, se define como riego de imprimación la aplicación de un ligante hidrocarbonado sobre una capa granular, previa a la colocación sobre ésta de una capa o de un tratamiento bituminoso.

- Riegos de Adherencia: Según el artículo 531 del PG-3, se define como riego de adherencia la aplicación de una emulsión bituminosa sobre una capa tratada con ligantes hidrocarbonados o conglomerantes hidráulicos, previa a la colocación sobre ésta de cualquier tipo de capa bituminosa que no sea un tratamiento superficial con gravilla, o una lechada bituminosa.

- Riegos de Curado: Según el artículo 532 del PG-3, se define como riego de curado la aplicación de una película continua y uniforme de emulsión bituminosa sobre una capa tratada con un conglomerante hidráulico, al objeto de dar impermeabilidad a toda su superficie.

5.3. Ensayos realizados

A la hora de efectuar los ensayos se ha procedido a separarlos en tres partes para tener una buena organización. En cada una de ellas se ha llevado a cabo el análisis de cada material necesario para el desarrollo final de las mezclas asfálticas. La composición del desarrollo experimental se divide como se explica a continuación:

- En una primera parte se tienen los ensayos ejecutados a los residuos procedentes de la escombrera. Estos desechos se corresponderán a los áridos, por lo que es necesario calificarlos como adecuados o inadecuados a la hora de su utilización en las mezclas.

- En la segunda parte se han analizado los lodos de corte correspondientes al filler para, como en el caso de los áridos, determinar si son adecuados en el empleo al que van a destinarse.

- Por último, en la tercera parte, se efectúan los ensayos sobre las probetas, que hay que fabricarlas según normativa, para determinar si cumplen con las exigencias a las que posteriormente será sometido el paquete de firmes una vez puesto en obra.

Con la correcta realización de los ensayos y el posterior análisis de los resultados, se va a procurar determinar los tipos y las cantidades de desechos, correspondientes a árido y filler, que se puede aprovechar para su empleo en las capas de firme, consiguiendo con ello cumplir las metas propuestas anteriormente en el apartado [3. Objetivos].

PARTE 1: ENSAYOS DE LOS ÁRIDOS

Para la determinación de las propiedades de los áridos se han llevado a cabo un total de nueve ensayos cuyos procedimientos de ejecución quedan explícitos a continuación:

5.3.1. Equivalente de arena

Se trata de un ensayo cuyo objetivo es conocer la existencia de material granular que puede resultar perjudicial, por el exceso de finos, para la mezcla bituminosa. Una elevada proporción de finos, en especial de arcillas, puede causar grandes daños a la estructura de las capas de firme, ya que las arcillas experimentan cambios volumétricos con el contacto con el agua. Por tanto, se debe conocer la cantidad de finos presente en el árido para determinar si éstos son adecuados para su empleo, lo que se consigue realizando el ensayo del Equivalente de Arena.

De acuerdo a la norma española UNE-EN 933-8, la expresión utilizada para la determinación del Equivalente de Arena (SE) es la siguiente:

$$\frac{h_2}{h_1} \cdot 100 = SE\ (\%) \tag{1}$$

donde:

h_1 se corresponde con la altura del nivel superior del floculado con relación a la base de la probeta.

h_2 se corresponde con la altura del sedimento.

Como se ve en la ecuación (1), este ensayo busca obtener la relación entre la fracción fina que ha sedimentado, correspondiente a las arenas, y la fracción fina floculada que son las arcillas. Por tanto, cuanto mayor sea el valor del Equivalente de Arena, menor será el contenido de arcillas en la muestra, por lo que se comportará de mejor manera. De hecho, en el PG-3 se dice que el valor del Equivalente de Arena para capas de base debe ser superior a 40 y superior a 45 para capas intermedias o de rodadura, aunque en general se exigen valores del Equivalente de Arena superiores a 50 para que puedan ser considerados como adecuados para su empleo en mezclas bituminosas. Aunque las capas de firme que se ensayarán en este trabajo de investigación no van a ser solicitadas de la misma manera que las capas de firme de carreteras, se van a relacionar con éstas, utilizando la normativa de las carreteras debido a que tal y como se comentó anteriormente en [2.3. Justificación], no existe actualmente normativa que regule las mezclas bituminosas para su empleo en líneas ferroviarias.

5.3.2. Calcimetría de Bernard (áridos)

La función de este ensayo es determinar el contenido de carbonatos de un suelo. Se basa en la reacción del ácido clorhídrico (HCl) con el carbonato cálcico ($CaCO_3$), ya que los carbonatos son compuestos que reaccionan a los ácidos, ocasionando un burbujeo al

producirse el desprendimiento de anhídrido carbónico (CO_2). Este gas desplaza un volumen de un líquido indicador, lo que determina la cantidad de CO_2 desprendido y por tanto la cantidad de carbonato cálcico presente en la muestra.

La reacción química producida es la que se presenta a continuación:

$$CaCO_3 + 2HCL = CaCl_2 + CO_2 + H_2O \quad (2)$$

De acuerdo con la norma española UNE 103200, la expresión matemática utilizada para la determinación del contenido de carbonatos de la muestra, expresado en tanto por ciento de carbonato cálcico es la siguiente:

$$\%\ de\ carbonato\ cálcico = \frac{0{,}2 \cdot v}{g \cdot V} \cdot 100 \quad (3)$$

donde:

0,2 son los gramos de carbonato cálcico empleado en el tarado.

v es el anhídrico carbónico medido en el ensayo de la muestra en centímetros cúbicos.

g son los gramos de muestra ensayada.

V es el anhídrico carbónico medido en el ensayo de tarado con $CaCO_3$ en centímetros cúbicos.

Según la ecuación (3) se puede observar que para llevar a cabo el ensayo es necesario realizar un calibrado del aparato mediante la reacción de carbonato cálcico puro, para posteriormente ensayar la muestra de árido. Con el calibrado del calcímetro se consiguen anular las variaciones en los resultados que pueden producirse por las diferencias de presión y temperatura existentes.

5.3.3. Resistencia a la fragmentación. Ensayo de los Ángeles

Este ensayo se basa en la determinación de la resistencia al desgaste de una muestra de áridos mediante el Coeficiente de los Ángeles. La muestra de árido a ensayar deberá tener una granulometría comprendida entre 10 y 14 mm cumpliendo con unas fracciones granulométricas expuestas en la norma UNE-EN 1097-2 y que son las que siguen:

- Entre el 60% y el 70% del árido deberá pasar por el tamiz de 12,5 mm.
- Entre el 30% y el 40% del árido deberá pasar por el tamiz de 11,2 mm.

Una vez obtenida la muestra con las características granulométricas expuestas anteriormente, se procede a realizar el ensayo en el tambor giratorio (ver figura 5.27 [5.4. Equipos utilizados]). Tras esto sólo queda tamizar por el tamiz 1,6 mm el árido contenido en el tambor y desechar aquel que pase por dicho tamiz. La masa del árido retenido se pesa y se introduce en la siguiente expresión proporcionada por la norma UNE-EN 1097-2 y que sirve para el cálculo del coeficiente de Los Ángeles (LA):

$$LA = \frac{5000 - m}{50} \tag{4}$$

donde:

m es la masa retenida por el tamiz 1,6 mm, expresada en gramos.

Con el resultado arrojado por el Coeficiente de los Ángeles se puede determinar si los áridos cumplen con las exigencias impuestas por el PG-3. Como se verá posteriormente en el apartado [6.3. Resultados de la resistencia a la fragmentación. Ensayo de los Ángeles] donde se exponen y explican los resultados de este ensayo, serán suelos adecuados aquellos que tengan un menor Coeficiente de los Ángeles, lo que indicará que son más resistentes a la fragmentación. Cuanto más resistente sea un suelo, mayor capacidad resistiva dotará a la mezcla bituminosa de la que forme parte y por tanto, mayor durabilidad tendrá ésta.

5.3.4. Determinación de la granulometría de las partículas (áridos)

La granulometría de los áridos es la distribución por tamaños de las partículas que componen dicho árido. Para conocer esta distribución se procede a separar los diferentes tamaños presentes en la muestra mediante el empleo de tamices con distintas aperturas.

Con el método del tamizado se consigue dividir y separar un material en varias fracciones granulométricas. El modelo de trabajo consiste en un previo lavado de la muestra de árido a ensayar, para conseguir eliminar las partículas de polvo y evitar la contaminación de los resultados del ensayo. Posteriormente se procede al tamizado en vía seca. La masa de las partículas retenidas en los diferentes tamices se expresará como porcentaje de la masa inicial del material.

Gracias a este ensayo, regulado por la norma UNE-EN 933-1, se consigue determinar la granulometría de la muestra, lo que va a determinar si dicho árido es el adecuado para su empleo en las diferentes mezclas. En caso de no ser así, se procederá a crear una curva granulométrica que sí cumpla con los límites inferiores y superiores, denominados husos granulométricos, que imponen las normas de las mezclas (ver figuras 5.3 y 5.5 del apartado [5.2.5. Mezclas asfálticas]).

5.3.5. Determinación de la forma de las partículas. Coeficiente de forma

Este ensayo tiene su objetivo en determinar la geometría de las partículas que componen el árido. Esto se consigue mediante el cálculo del coeficiente de forma de los áridos gruesos.

El método utilizado para la obtención de dicho coeficiente de forma viene definido en la norma UNE-EN 933-4. Consiste en la toma de medidas de las partículas de la muestra de árido, realizando una comparación entre la dimensión mayor (longitud, L) y la menor (grosor, E) de dichas partículas.

De acuerdo con la norma española UNE-EN 933-4, la expresión utilizada para el cálculo del coeficiente de forma (SI) es la siguiente:

$$SI = \frac{M_2}{M_1} \cdot 100 \quad (5)$$

donde:

M_1 es la masa de la muestra de ensayo, expresada en gramos.

M_2 es la masa de las partículas no cúbicas, expresada en gramos. Las partículas no cúbicas son aquellas cuya relación L/E > 3.

Observando la ecuación (5), se llega a la conclusión de que el Coeficiente de Forma determina la proporción de partículas no cúbicas presentes en la muestra de suelo. Esto es un parámetro muy importante a tener en cuenta a la hora de utilizar los áridos para la fabricación de mezclas bituminosas, debido a que durante la compactación de las capas bituminosas, así como bajo la acción del tráfico, las partículas angulosas, es decir, las no cúbicas (L/E > 3) pueden romperse, modificando la granulometría inicial del árido. Esto tendrá consecuencias graves en el caso de existir una gran proporción de partículas no cúbicas en el árido, ya que la división de éstas en partículas de menor tamaño provoca una disminución de árido grueso, lo que conlleva a una disminución de la resistencia de la mezcla a las cargas del tráfico ferroviario.

5.3.6. Determinación de la resistencia a ciclos de hielo y deshielo

Los áridos son susceptibles de ser dañados por acciones repetidas de cambio de temperatura. Además, la inclusión de agua en el interior de los poros de los áridos puede ocasionar que durante las bajas temperaturas dicha agua se congele y durante las temperaturas cálidas vuelva a estado líquido, con sus respectivos cambios de volumen. Esto acaba por ocasionar el desgaste de la roca y por consiguiente su disminución de resistencia.

Con este ensayo lo que se busca es conocer el comportamiento del árido al someterlo a cambios de temperatura mediante la acción cíclica del hielo y deshielo. Los resultados van

a permitir determinar si el árido tiene susceptibilidad a ser modificado por este tipo de alteración.

De acuerdo con la norma española UNE-EN 1367-1, la determinación del porcentaje de pérdida de masa (F) se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$F = \frac{(M_1 - M_2)}{M_1} \cdot 100 \qquad (6)$$

donde:

M_1 es la masa inicial total en seco de las tres submuestras de ensayo, expresada en gramos.

M_2 es la masa final total en seco de las tres submuestras de ensayo que ha sido retenida sobre el tamiz de ensayo especificado, expresada en gramos.

El fundamento de la ecuación (6) consiste en la determinación del porcentaje de la masa correspondiente al árido que se ha separado en partículas de menor tamaño por acción de los ciclos de hielo-deshielo. Por tanto, cuanto mayor sea la proporción de partículas que han sufrido esa disgregación, más susceptible será el árido de modificar sus propiedades ante cambios significativos de temperatura y por consiguiente no podrá ser utilizado en mezclas bituminosas.

5.3.7. Determinación de las densidades, coeficiente de absorción y contenido de agua del árido grueso

En este ensayo se utilizan los métodos necesarios para la determinación de los siguientes parámetros, definidos en la norma UNE 83134 (si existen algunos conceptos de las ecuaciones que no se explican en este apartado, consultar en el apartado de resultados [6.7]):

- Densidad real (dr): se calcula dividiendo la masa seca de la muestra del árido grueso entre el volumen ocupado por la materia sólida, incluyendo los huecos existentes. Su expresión matemática es la siguiente:

$$dr = \frac{M_s}{M_a - M'_a} \tag{7}$$

- Densidad real saturada pero con la superficie seca (drsss): su valor se obtiene mediante la división de la masa de la muestra de los áridos embebida, con superficie seca y determinada en el aire, entre el volumen que ocupa la materia sólida, incluyendo los huecos.

$$drsss = \frac{M_a}{M_a - M'_a} \tag{8}$$

- Coeficiente de absorción de agua (Aρ): consiste en la determinación del porcentaje de agua existente en el árido sumergido, debida a la absorción, en relación con el total de la masa seca de la muestra.

$$A_\rho = \frac{M_a - M_s}{M_s} \cdot 100 \tag{9}$$

- Contenido en agua de los áridos (h): es el porcentaje de agua presente en el árido sin ningún tratamiento, es decir, con el árido tal y como viene sin ser ensayado.

$$h = \frac{M - M'_s}{M'_s} \cdot 100 \tag{10}$$

5.3.8. Determinación del coeficiente de absorción del árido fino

Este ensayo determina la forma de obtener el valor del coeficiente de absorción del árido fino. Este parámetro está definido en la norma UNE 83133 y se obtiene utilizando la siguiente ecuación:

$$Coeficiente\ de\ Absorción\ (\%) = \frac{M - M_s}{M_s} \quad (11)$$

donde:

M corresponde a la masa de la muestra de árido saturado de agua, en gramos.

M_s es la masa de la muestra de árido una vez secado, en gramos.

Tal y como se observa la ecuación (11), el coeficiente de absorción consiste en la proporción de agua existente en la muestra saturada de árido fino en relación a la masa seca.

5.3.9. Determinación de la limpieza superficial del árido grueso

El procedimiento para llevar a cabo este ensayo viene descrito en la norma UNE 146130 (Anexo C). Su objeto es la determinación de la limpieza superficial de los áridos.

Los parámetros a calcular para finalmente conseguir obtener el valor del coeficiente de limpieza superficial son los siguientes, y vienen definidos en la norma antes mencionada UNE 146130:

- Determinación del índice de sequedad de la muestra (Is):

$$I_s = \frac{M_{1s}}{M_{1h}} \quad (12)$$

donde:

M_{1s} es la muestra de masa seca.

M_{1h} es la muestra de masa tal como viene.

- Determinación de la cantidad de masa seca (M_s):

$$M_s = M_h \cdot I_s \tag{13}$$

donde:

M_h es la muestra ensayada.

I_s es el índice de sequedad de la muestra.

- Determinación de las impurezas en gramos de las partículas inferiores a 0,5 mm:

$$Impurezas = M_s - m \tag{14}$$

donde:

M_s es la masa seca de la muestra ensayada, en gramos.

m es la masa seca de las partículas superiores a 0,5 mm, en gramos.

- Por último, ya sólo queda calcular el coeficiente de limpieza superficial (C):

$$C = \frac{M_s - m}{M_s} \cdot 100 \tag{15}$$

El motivo principal de este ensayo es que el árido grueso, tal y como establece el PG-3, no podrá estar recubierto o tener adheridos componentes como terrones de arcilla, materia vegetal, marga u otras materias extrañas cuya presencia puede disminuir la durabilidad de la capa.

PARTE 2: ENSAYOS DE LOS FILLERS

Para el ensayo de las propiedades de los fillers se han llevado a cabo un total de seis ensayos cuyos procedimientos de ejecución quedan explícitos a continuación:

5.3.10. Análisis granulométrico por tamizado del polvo mineral (filler)

Este ensayo, descrito en la norma UNE 146300, detalla el procedimiento que debe seguirse para la realización del análisis granulométrico, por tamizado, del polvo mineral utilizado como material para la construcción de carreteras.

El filler será analizado por sus fracciones granulométricas separadas según los tamices con aperturas de 0,063 mm, 0,250 mm y 0,500 mm.

El resultado del análisis granulométrico del polvo mineral se expresará como el tanto por ciento del total que pasa por cada tamiz utilizado.

5.3.11. Determinación del Límite Líquido, Plástico y el Índice de Plasticidad

La determinación del límite líquido (LL), siguiendo la norma UNE 103103, se lleva a cabo mediante la utilización del aparato de Casagrande. Consiste en la obtención de la humedad que tiene un suelo amasado con agua y colocado en una cuchara normalizada, cuando un surco, realizado con un acanalador normalizado, que divide dicho suelo en dos

mitades, se cierra a lo largo de su fondo en una distancia de 13 mm, tras haber dejado caer 25 veces la mencionada cuchara desde una altura de 10 mm sobre una base también normalizada, con una cadencia de 2 golpes por segundo.

La determinación del límite plástico (LP), siguiendo la norma UNE 103104, se lleva a cabo mediante la obtención de la humedad más baja con la que pueden formarse, con un suelo, cilindros de 3 mm de diámetro, haciéndolo rodar entre los dedos de las manos y una superficie lisa, hasta que éstos empiecen a resquebrajarse.

El índice de plasticidad (IP) es el rango de humedades en el que el suelo tiene un comportamiento plástico. Por definición, es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico. A igualdad de otros factores, cuanto mayor es el índice de plasticidad de un suelo menor es su permeabilidad y viceversa. De hecho, a las arenas limpias se les atribuye (de manera no totalmente exacta) un índice de plasticidad nulo debido a su gran permeabilidad.

5.3.12. Método para la determinación de la densidad aparente del filler en Tolueno

Este método, descrito en la norma UNE-EN 1097-3 (Anexo A) y NLT-176, consiste en calcular la densidad aparente de una muestra de filler empleando Tolueno, aunque también es posible usar queroseno para la realización del ensayo, puesto que ambos productos no disuelven el filler ni reaccionan con él.

La densidad aparente, determinada en estas condiciones, es una medida relativa del grado de finura del polvo mineral, que es cualidad importante en tecnología de las mezclas bituminosas para firmes.

Según la NLT-176, la finura del polvo mineral está relacionada con su mayor o menor actividad desde el punto de vista de la estabilización del ligante en el sistema polvo mineral-betún. Valores de la densidad aparente en tolueno entre 0,5 y 0,8 g/cm^3 corresponden a una actividad media adecuada para su utilización en mezclas bituminosas. Valores inferiores o superiores a tales límites denota, respectivamente, una actividad excesiva o insuficiente.

5.3.13. Calcimetría de Bernard (fillers)

La función de este ensayo es determinar el contenido de carbonatos de un filler. Se basa en la reacción del ácido clorhídrico (HCl) con el carbonato cálcico ($CaCO_3$), ya que los carbonatos son compuestos que reaccionan a los ácidos, ocasionando un burbujeo al producirse el desprendimiento de anhídrido carbónico (CO_2). Este gas desplaza un volumen de un líquido indicador, lo que determina la cantidad de CO_2 desprendido y por tanto la cantidad de carbonato cálcico presente en el filler.

La reacción química producida es la que se presenta a continuación:

$$CaCO_3 + 2HCL = CaCl_2 + CO_2 + H_2O \quad (16)$$

De acuerdo con la norma española UNE 103200, la expresión matemática utilizada para la determinación del contenido de carbonatos de la muestra, expresado en tanto por ciento de carbonato cálcico es la siguiente:

$$\%\ de\ carbonato\ cálcico = \frac{0{,}2 \cdot v}{g \cdot V} \cdot 100 \quad (17)$$

donde:

0,2 son los gramos de carbonato cálcico empleado en el tarado.

v es el anhídrico carbónico medido en el ensayo de la muestra en centímetros cúbicos.

g son los gramos de muestra ensayada.

V es el anhídrico carbónico medido en el ensayo de tarado con $CaCO_3$ en centímetros cúbicos.

Este ensayo está relacionado con el Calcímetro de Bernard realizado a los áridos, ya que aunque se analicen diferentes componentes, el ensayo es el mismo, por lo que la explicación será prácticamente la misma que la del apartado [5.3.2. Calcimetría de Bernard (áridos)]. Por lo que al igual que con los áridos, con el calibrado del calcímetro se consiguen anular las variaciones en los resultados que pueden producirse por las diferencias de presión y temperatura existentes.

5.3.14. Determinación del contenido en agua por secado en estufa

Este ensayo proporciona una medida del contenido total de agua libre presente en una muestra de ensayo de filler.

El contenido en agua (w), de acuerdo a la norma UNE-EN 1097-5, se determina por la diferencia entre las masas húmeda y seca de la muestra de ensayo y se expresa en forma de porcentaje respecto de la masa seca de la muestra de ensayo, mediante la siguiente expresión:

$$w = \frac{M_1 - M_3}{M_3} \cdot 100 \qquad (18)$$

donde:

M_1 es la masa de la muestra de ensayo, en gramos.

M_3 es la masa constante de la muestra de ensayo seca, en gramos.

5.3.15. Determinación de la densidad real del filler. Método del Picnómetro

Este ensayo permite determinar el volumen de muestra compuesta por partículas de forma irregular. La densidad puede determinarse, cuando la masa de la muestra es conocida.

El fundamento del ensayo, determinado en la norma UNE-EN 1097-7, se basa en la sustitución de una cierta cantidad de un líquido de densidad conocida por la muestra de ensayo. En un picnómetro de volumen conocido, se introduce la muestra de ensayo y se rellena por completo con el líquido. El volumen de este líquido se calcula dividiendo la masa del líquido añadido por su densidad. El volumen de la muestra de ensayo se calcula restando este volumen del volumen del picnómetro.

Para el cálculo de la densidad del filler ρ_f en megagramos por metro cúbico, se utiliza la siguiente ecuación:

$$\rho_f = \frac{m_1 - m_0}{V - \frac{m_2 - m_1}{\rho_l}} \tag{19}$$

donde:

m_o es la masa del picnómetro vacío, con su tapón, en gramos.

m_1 es la masa del picnómetro con la muestra de ensayo de filler, en gramos.

m_2 es la masa del picnómetro conteniendo la muestra de ensayo de filler, y relleno por completo con el líquido.

V es el volumen del picnómetro, en mililitros (véase más abajo).

ρ_l es la densidad del líquido a 25 ºC, en megagramos por metro cúbico (véase más abajo).

ρ_f es la densidad real del filler a 25 ºC, en megagramos por metro cúbico.

Para calcular el volumen del picnómetro en mililitros se usa la siguiente expresión:

$$V = \frac{m_3 - m_0}{\rho_w} \quad (20)$$

donde

V es el volumen del picnómetro, en mililitros.

m_0 es la masa del picnómetro vacío, con su tapón, en gramos.

m_3 es la masa del picnómetro lleno de agua, en gramos.

ρ_w es la densidad del agua a 25 ºC, en megagramos por metro cúbico (= 0,99707).

Para calcular la densidad del líquido, en megagramos por metro cúbico, se utiliza la siguiente expresión:

$$\rho_l = \frac{m_4 - m_0}{V} \left({}^{Mg}/_{m^3} \right) \quad (21)$$

donde:

ρ_l es la densidad del líquido a 25 ºC, en megagramos por metro cúbico.

m_0 es la masa del picnómetro vacío, con tapón, en gramos.

m_4 es la masa del picnómetro lleno de líquido, en gramos.

V es el volumen del picnómetro, en mililitros.

PARTE 3: ENSAYOS DE LAS PROBETAS

5.3.16. Preparación de probetas mediante compactador de impactos

El sistema de fabricación de probetas de mezcla bituminosa mediante la compactación por impactos viene detallado en la norma UNE-EN 12697-30. Para preparar las probetas, la mezcla bituminosa se transfiere a un molde de compactación. De esta manera, la mezcla se introduce en uno de los compactadores, sometiéndola a un número concreto de impactos (el número de golpes por cada cara de la probeta suele ser 50 pero puede variar dependiendo de las propiedades buscadas). Después se deja que la probeta se enfríe hasta la temperatura ambiente. Dicha probeta deber ser un cilindro con una dimensiones de (101,6 ± 0,1) mm de diámetro y (63,5 ± 2,5) mm de altura, según la norma UNE-EN 12697-30 mencionada anteriormente.

5.3.17. Determinación de la densidad máxima

Con este ensayo se consigue obtener la densidad máxima de una mezcla bituminosa, definida como la masa por unidad de volumen, sin huecos de aire, de una mezcla asfáltica a una temperatura de ensayo conocida. En la norma donde se detalla el procedimiento operatorio para llevar a cabo dicho ensayo es la UNE-EN 12697-5. En ella se especifican tres métodos para obtener la densidad máxima:

- Método volumétrico: el volumen de la muestra se mide como el desplazamiento de agua o de disolvente efectuado por la muestra en un picnómetro.
- Método hidrostático: el volumen de la muestra se calcula a partir de la masa seca de la muestra y a partir de su masa en agua.
- Método matemático: la densidad máxima de una mezcla bituminosa se calcula a partir de su composición (contenido de ligante y contenido de árido) y de las densidades de los materiales constituyentes.

En la realización de este ensayo se ha utilizado el procedimiento hidrostático para el cálculo de la densidad máxima de la mezcla bituminosa.

5.3.18. Determinación de la densidad aparente de probetas bituminosas

Este ensayo tiene como objeto la determinación de la densidad aparente de una probeta bituminosa. Tal y como se explica en la norma UNE-EN 12697-6, existen cuatro procedimientos para el cálculo de la densidad aparente, cuya elección vendrá determinada por el contenido estimado de huecos de aire en la probeta y de la accesibilidad de los mismos:

- Densidad aparente en seco: para probetas con una superficie muy cerrada.
- Densidad aparente en seco con superficie saturada (SSD): para probetas con una superficie cerrada.
- Densidad aparente de una probeta impermeabilizada: para probetas con una superficie abierta o rugosa.
- Densidad aparente por método geométrico: para probetas que tengan una superficie regular y formas geométricas.

En la realización de este ensayo se ha utilizado el procedimiento de densidad aparente en seco con superficie saturada (SSD) para el cálculo de la densidad aparente de las probetas bituminosas.

5.3.19. Determinación del contenido de huecos en las probetas bituminosas

Este ensayo, cuyo procedimiento operativo queda explícito en la norma UNE-EN 12697-8, describe un método para calcular las siguientes características volumétricas de una probeta bituminosa compactada:

- Determinación del contenido de huecos de aire (V_m): se calcula utilizando la densidad máxima de la mezcla y la densidad aparente de la probeta, con la siguiente expresión matemática:

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \cdot 100\ (\%) \tag{22}$$

donde:

V_m es el contenido de huecos de aire de la mezcla, expresado como un porcentaje (%).

ρ_m es la densidad máxima de la mezcla, expresada en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3).

ρ_b es la densidad aparente de la probeta, expresada en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3).

- Determinación del porcentaje de huecos rellenos con ligante existentes en el árido (VFB): se calcula a partir del contenido de ligante, de los huecos existentes en el árido mineral, de la densidad aparente de la probeta, y de la densidad del ligante.

$$VFB = ((B \cdot \rho_b / \rho_B)/VMA) \cdot 100\ (\%) \tag{23}$$

donde:

VFB es el porcentaje de huecos rellenos con ligante existentes en el árido mineral.

B es el porcentaje de ligante en la probeta (en una mezcla del 100%).

ρ_b es la densidad aparente de la probeta, expresada en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3).

P_B es la densidad del ligante, expresada en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3).

VMA es el contenido de huecos del árido mineral, expresado como un porcentaje.

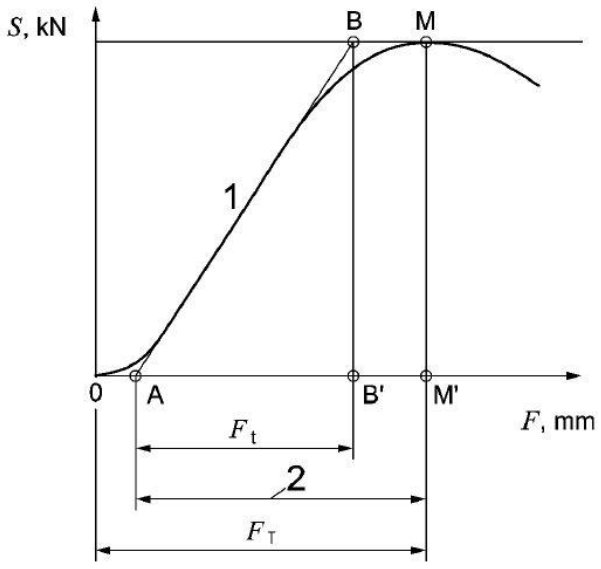
$$VMA = V_m + B \cdot \rho_b / \rho_B \cdot 100\ (\%) \qquad (24)$$

5.3.20. Determinación de la estabilidad y la deformación Marshall

Este ensayo, detallado en la norma europea UNE-EN 12697-34, especifica un método de ensayo para la determinación de los valores de estabilidad, deformación y cociente Marshall de las probetas de mezclas bituminosas.

La resistencia de la probeta durante el ensayo se puede medir mediante anillos dinamométricos acoplados directamente a la prensa. La deformación puede obtenerse con un comparador dividido en décimas de milímetro (0,1 mm) y de lectura final fija, sujeto firmemente en la mordaza superior y cuyo vástago se apoya en una palanca ajustable, acoplada en la mordaza inferior. Para el registro gráfico de la curva estabilidad-deformación, es preferible disponer de prensas con células de carga y transductor de desplazamiento.

Tras la ejecución del ensayo, se obtendrá la curva de estabilidad y deformación Marshall expuesta a continuación:



- Leyenda:

1 Tangente.

2 Deformación, F.

Figura 5.6: Curva Estabilidad-Deformación Marshall

De la curva de estabilidad y deformación Marshall se obtienen los siguientes parámetros:

- Estabilidad (S): Carga máxima de una probeta de asfalto moldeada, en kilonewtons (kN).
- Deformación (F): Deformación de la probeta moldeada, expresada en milímetros (mm), sometida a la carga máxima, menos la deformación nominal obtenida por extrapolación de la tangente del gráfico en el que se representa la deformación en función de la carga, para la carga cero (de A a M' en la figura 5.3).
- Valor de la deformación por extrapolación (F_t): Deformación nominal de la probeta moldeada, expresada en milímetros (mm), obtenida por extrapolación de la tangente del gráfico en que se representa la deformación en función de la carga, para la carga de estabilidad menos la deformación nominal obtenida por extrapolación de la tangente para la carga cero (de A a B' en la figura 5.3).
- Deformación total (F_T): Deformación de la probeta moldeada, expresada en milímetros (mm), a carga total (0 a M' en la figura 5.3).
- Cociente Marshall: Relación S/F entre la estabilidad (S) y la deformación (F).

5.3.21. Determinación del escurrimiento del ligante de mezclas bituminosas

Este ensayo, descrito por la norma UNE-EN 12697-18, muestra dos posibles métodos para la determinación del escurrimiento de ligante en mezclas bituminosas:

- Método de la cesta: Este método mide directamente el escurrimiento del ligante, pero cuando se aplica sobre mezclas bituminosas con fibras o sobre mezclas cuyo contenido de mortero es mayor que en las mezclas drenantes se pueden producir obstrucciones en los orificios de las cestas de escurrimiento, que reducirían el escurrimiento del ligante.
- Método Schellenberg: Es aplicable a materiales asfálticos que no sean mezclas drenantes, o a las mezclas drenantes que contengan fibras.

5.3.22. Estudio del comportamiento a fatiga de mezclas asfálticas mediante el ensayo BTD (Barcelona Tracción Directa)

El ensayo BTD (Barcelona Tracción Directa) desarrollado en la Universidad de Cataluña por el equipo profesional que dirige el Dr. Félix Pérez Jiménez sirve para observar y pronosticar el comportamiento a fatiga de mezclas asfálticas.

Según [31], este ensayo se caracteriza por aplicar una combinación de fuerzas, de tal forma que se somete a una probeta a un campo de esfuerzos a flexotracción, tratando de simular el deterioro por fatiga que sufren las mezclas asfálticas a partir de la propagación de una fisura desde su interfase con la base granular hasta su extremo superior (superficie del pavimento).

Para comenzar con el proceso de ejecución se utiliza el sistema de prueba MTS conformado por un marco de carga, una consola que registra la temperatura y un disco duro que registra los resultados de ensayo.

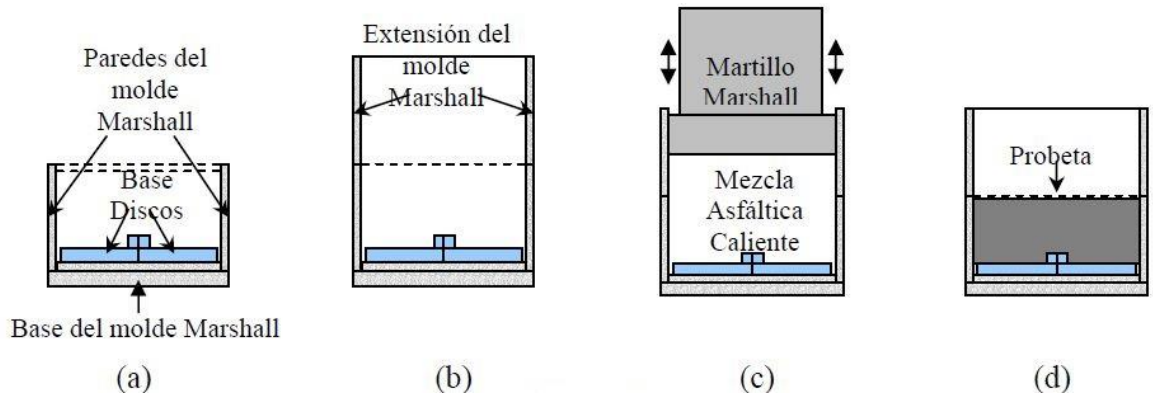


Figura 5.7: Etapas para la compactación de las probetas a usarse en el ensayo BTD [31]

Tiene la ventaja de que se puede aplicar en dos modos de prueba, uno estático (bastante simple y corto) y otro dinámico, entregando ambos resultados que son equivalentes.

- Modo Estático: En este modo de ensayo se aplica un desplazamiento controlado a una velocidad fija de 1 mm/min, manteniendo la temperatura constante a 5ºC, hasta

llegar a la rotura total de la probeta. Se mide la carga y el desplazamiento en la dirección de aplicación de la carga.

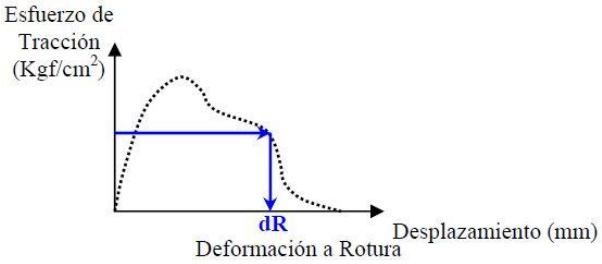


Figura 5.8: Curva de Rotura que se obtiene del Modo Estático [31]

- Modo dinámico: En esta etapa, las probetas se someten a fatiga bajo una cara sinusoidal controlada de 10 Hz y una temperatura constante de 5ºC. Se mide el número de ciclos de carga aplicados y las deformaciones en la fibra superior de la probeta mediante un extensómetro. La resistencia a fatiga de la mezcla se relaciona, mediante este ensayo, con la deformación unitaria en la fibra inferior de la probeta (εi), que es donde comienza la fisuración.

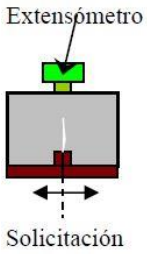


Figura 5.9: Probeta a tracción [31]

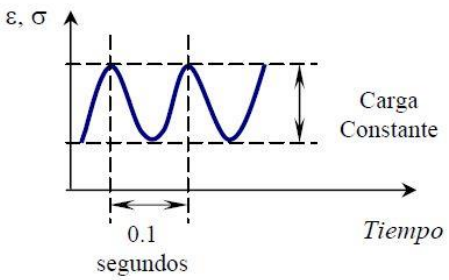


Figura 5.10: Carga aplicada en la etapa dinámica del ensayo BTD [31]

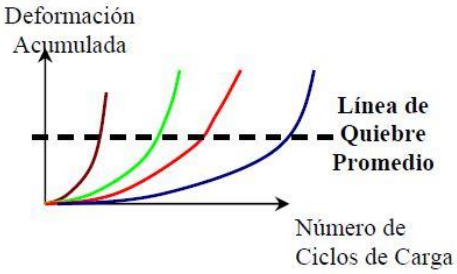


Figura 5.11: Deformación crítica "dC" del ensayo BTD [31]

En el modo estático los parámetros a calcular son los siguientes:

- Deformación a Rotura (dR): En general corresponde al instante en que el esfuerzo máximo soportado por la probeta de ensayo se reduce a la mitad de su magnitud. Esta deformación se obtiene gráficamente a partir de la curva carga-deformación.

- Energía Específica de Fractura (Gf), en Kgf-mm/cm^2:

$$Gf = \frac{\int_0^{\Delta máx} P(\Delta) d\Delta}{(H \cdot D)} \quad (25)$$

donde:

P (Δ) carga en función del desplazamiento, en Kgf.

dΔ delta desplazamiento aplicado a la probeta de ensayo, en mm.

H altura total del área resistente de la probeta, en cm.

D diámetro total de la probeta, en cm.

- Resistencia Máxima a Tracción ($\sigma_{máx}$), en Kgf/cm^2:

$$\sigma_{máx} = \frac{P_{máx}}{H \cdot D} \quad (26)$$

donde:

$P_{máx}$ carga máxima lograda en el ensayo, en Kgf.

H altura total del área resistente de la probeta, en cm.

D Diámetro total de la probeta, en cm.

Luego habría que realizar el modo dinámico para la obtención de la deformación crítica (dC), que consiste en elaborar las curvas de deformación acumulada versus el número de ciclos de carga y trazar una línea promedio sobre los puntos de inflexión. Pero la peculiaridad que existe en este ensayo es que se demuestra una clara correlación entre la deformación a rotura obtenida del modo estático con la deformación crítica resultante del modo dinámico, lo que indica que bastaría solamente con realizar el ensayo estático para conocer el comportamiento a fatiga que tendrá la mezcla durante la vida en servicio, es decir, a partir del parámetro "dR" (deformación a rotura) se obtiene "dC", luego impuesta

una deformación unitaria "ε_i" en la interfase de la mezcla asfáltica se determina "ε_i/dC" y se sabe el número de ciclos que resistirá la mezcla antes de que se fisure.

El vínculo entre ambas relaciones viene definida de forma general tras el estudio de prácticamente la totalidad de las mezclas asfálticas existentes en España y se observa en la gráfica inferior.

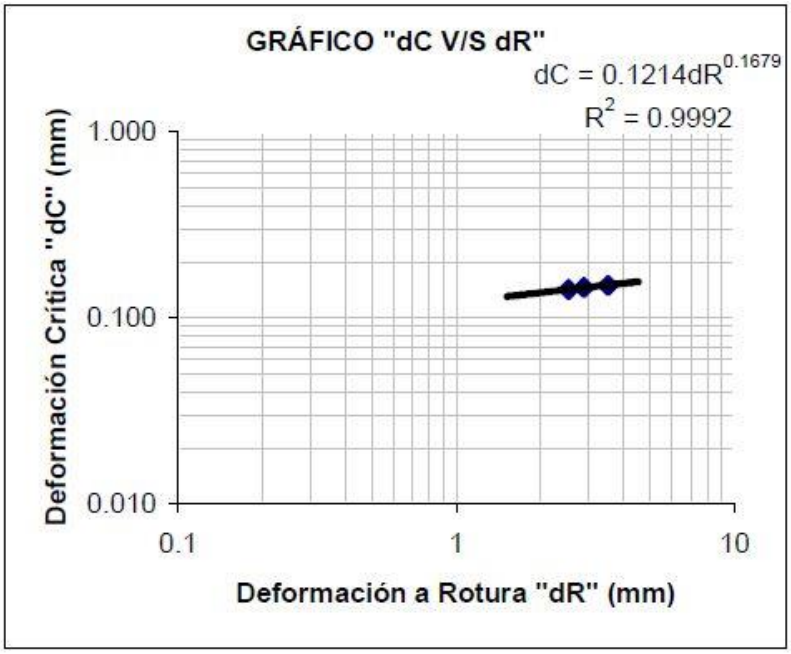


Figura 5.12: Correlación entre los valores "dR" y "dC" del Ensayo BTD

Conociendo la deformación unitaria ε_i admisible en la capa de mezcla bituminosa y la deformación crítica "dC" se tiene el dato necesario para entrar en la gráfica inferior que relaciona el cociente de la deformación unitaria y la deformación crítica con la vida a fatiga y obtener el número de ciclos de carga "N" que soportará la mezcla antes de que se fisure, es decir, su resistencia a la fisuración por fatiga.

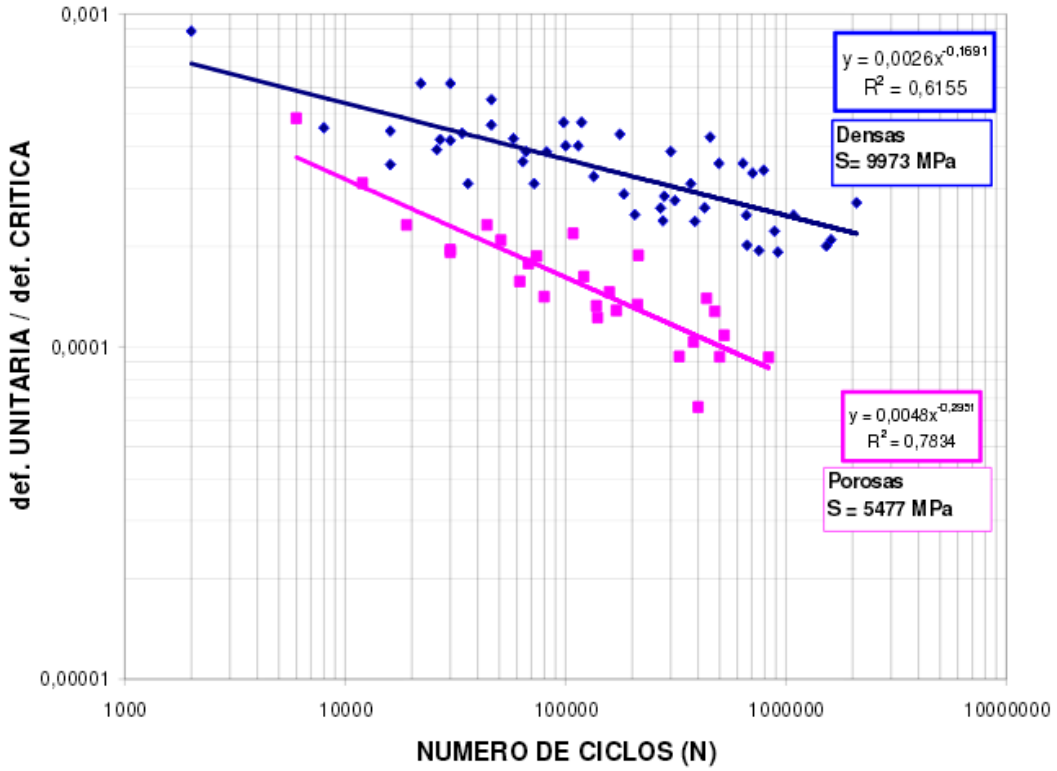


Figura 5.13: Relación entre ε_i /dC y Número de Ciclos "N"

5.4. Equipos utilizados

A continuación se van a mostrar algunos de los diferentes equipos utilizados en los ensayos y que pertenecen al laboratorio de Materiales de la E.P.S. de Linares:

5.4.1. Equipos de preparación y acondicionamiento del material

Figura 5.14: Estufa

Figura 5.15: Hornillo

Figura 5.16: Recipiente de vacío

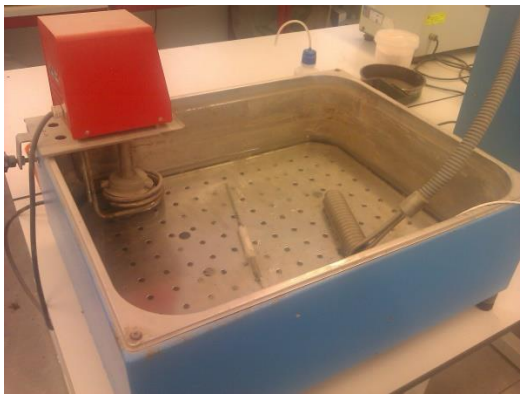


Figura 5.17: Baño María

Figura 5.18: Molinillo

Figura 5.19: Tamices

Figura 5.20: Mezcladora

Figura 5.21: Compactadora

Figura 5.22: Desmoldadora

Figura 5.23: Compactadora Marshall

5.4.2. Equipos de toma de medidas y resultados

Figura 5.24: Balanza hidrostática

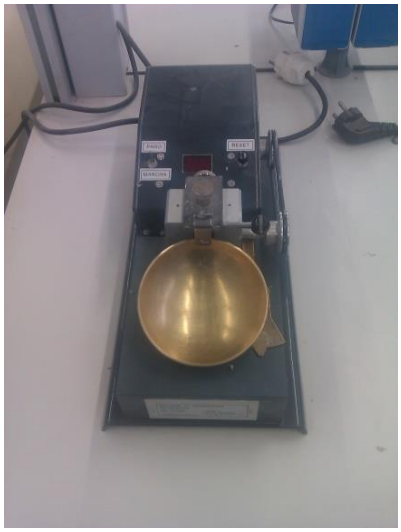


Figura 5.25: Cuchara de Casagrande

Figura 5.26: Báscula

Figura 5.27: Tambor giratorio (Los Ángeles)

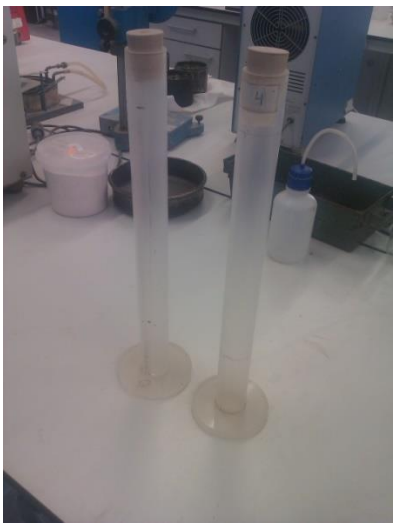


Figura 5.28: Probetas cilíndricas graduadas

Figura 5.29: Calcímetro de Bernard

6. Resultados y discusión

En este apartado se muestran los resultados de los ensayos realizados en el laboratorio donde al final de cada uno se expone una pequeña conclusión sobre el significado de los resultados obtenidos.

Su distribución se halla en tres partes, donde en primer lugar aparecen los resultados de los ensayos de los áridos, en segundo lugar los de los ensayos de los fillers y por último lo de los ensayos de las probetas.

PARTE 1: RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LOS ÁRIDOS

6.1. Resultados Equivalente de arena

En la toma de resultados, el significado de cada apartado es el siguiente:

- M1, M2, M3, M4, M5 y M6: Se corresponde con las veces que se ha realizado el ensayo con un mismo tipo de suelo.

En las tablas expuestas a continuación se muestran las medidas tomadas durante la ejecución del ensayo, además de los resultados del valor del equivalente de arena obtenido:

- Gran Parada (131023-1-1):

MUESTRAS	H1 (ml)	H2 (ml)	EQUIVALENTE DE ARENA (SE)
M1	102	76	**75**
M2	98	79	**81**
M3	100	70	**70**
M4	104	76	**73**
M5	98	77	**79**
M6	98	75	**77**

Tabla 6.1: Equivalente de arena de Gran Parada (131023-1-1)

- Rambla Orica (131023-2-1):

MUESTRAS	H1 (ml)	H2 (ml)	EQUIVALENTE DE ARENA (SE)
M1	100	87	**87**
M2	102	90	**88**
M3	94	74	**79**
M4	102	70	**69**
M5	100	73	**73**
M6	100	74	**74**

Tabla 6.2: Equivalente de arena de Rambla Orica (131023-2-1)

- Rambla Orica (131023-2-2):

MUESTRAS	H1 (ml)	H2 (ml)	EQUIVALENTE DE ARENA (SE)
M1	116	76	**66**
M2	98	78	**80**
M3	97	78	**80**
M4	98	80	**82**
M5	104	77	**74**
M6	98	74	**76**

Tabla 6.3: Equivalente de arena de Rabla Orica (131023-2-2)

- J. Abarca (131023-3-1):

MUESTRAS	H1 (ml)	H2 (ml)	EQUIVALENTE DE ARENA (SE)
M1	112	90	**80**
M2	112	92	**82**
M3	117	90	**77**
M4	116	87	**75**
M5	114	84	**74**
M6	114	86	**75**

Tabla 6.4: Equivalente de arena de J. Abarca (131023-3-1)

- J. Abarca (131023-3-2):

MUESTRAS	H1 (ml)	H2 (ml)	EQUIVALENTE DE ARENA (SE)
M1	115	92	**80**
M2	113	91	**81**
M3	116	90	**78**
M4	114	92	**81**
M5	114	93	**81**
M6	114	92	**81**

Tabla 6.5: Equivalente de arena de J. Abarca (131023-3-2)

- Aleros Oscuros (131120-4-1):

MUESTRAS	H1 (ml)	H2 (ml)	EQUIVALENTE DE ARENA (SE)
M1	106	84	**79**
M2	108	83	**77**
M3	104	84	**81**
M4	104	83	**80**
M5	106	79	**75**
M6	105	83	**79**

Tabla 6.6: Equivalente de arena de Aleros Oscuros (131120-4-1)

- Aleros Amarillos (131120-4-2):

MUESTRAS	H1 (ml)	H2 (ml)	EQUIVALENTE DE ARENA (SE)
M1	96	72	**75**
M2	98	76	**78**
M3	94	77	**82**
M4	96	75	**78**
M5	98	76	**78**
M6	96	77	**80**

Tabla 6.7: Equivalente de arena de Aleros Amarillos (131120-4-2)

Según lo establecido en el PG-3 y tal y como se comentó anteriormente en el apartado [5.3.1. Equivalente de Arena], se va a exigir un valor del equivalente de arena superior a 50 para considerar los áridos como aptos para su empleo en mezclas bituminosas, según este ensayo. En este caso, los valores son superiores a las limitaciones fijadas anteriormente,

por lo tanto este ensayo no provocará el descarte de ningún tipo de los desechos procedentes de escombrera suministrados. Con ello se respeta la normativa vigente para la utilización de los áridos en mezclas bituminosas.

6.2. Resultados Calcimetría de Bernard (áridos)

En este ensayo se ha optado por ensayar un tipo de Rambla Orica y uno de J. Abarca ya que aunque se disponen de dos muestras, es el mismo árido con las mismas propiedades y resulta indiferente que se hayan recogido en distinto lugar debido a que son cercanos los puntos de recogida al pertenecer a la misma escombrera de la cantera.

En la toma de resultados, el significado de cada apartado es el siguiente:

- M1C: Corresponde con la muestra realizada con el carbonato cálcico puro para calibrar el aparato.
- M1, M2, M3 y M4: Son las muestras de árido a las que han sido realizadas el ensayo.

En las tablas expuestas a continuación se muestran las medidas tomadas durante la ejecución del ensayo, además de los resultados del valor del porcentaje de carbonato cálcico contenido en la muestra:

- Gran Parada (131023-1-1):

MUESTRA	M1C	M1	M2	M3	M4
MASA (G)	0,202	0,208	0,201	0,202	0,203
LEC. INCIAL (ML)	4	3	6	1,4	4,8
LEC. FINAL (ML)	59,7	47,8	68,6	71	76,6
VOLUMEN (ML)	55,7	44,8	62,6	69,6	71,8
CALCIMETRÍA (%)		**78,110**	**74,507**	**82,429**	**84,615**

Tabla 6.8: % $CaCO_3$ de Gran Parada (131023-1-1)

- Rambla Orica (131023-2-1):

MUESTRA	M1C	M1	M2	M3	M4
MASA (G)	0,204	0,206	0,202	0,208	0,205
LEC. INCIAL (ML)	5,4	0	5,4	4,4	7,8
LEC. FINAL (ML)	59,8	48	44,2	48	48,6
VOLUMEN (ML)	54,4	48	38,8	43,6	40,8
CALCIMETRÍA (%)		**82,433**	**72,029**	**78,605**	**79,292**

Tabla 6.9: % $CaCO_3$ de Rambla Orica (131023-2-1)

- J. Abarca (131023-3-1):

MUESTRA	M1C	M1	M2	M3	M4
MASA (G)	0,203	0,212	0,21	0,216	0,208
LEC. INCIAL (ML)	4,2	3,8	4,4	5,6	3,4
LEC. FINAL (ML)	86	79,4	81,2	83,8	82
VOLUMEN (ML)	81,8	75,6	76,8	78,2	78,6
CALCIMETRÍA (%)		**88,497**	**90,757**	**89,845**	**93,778**

Tabla 6.10: % $CaCO_3$ de J. Abarca (131023-3-1)

- Aleros Oscuros (131120-4-1):

MUESTRA	M1C	M1	M2	M3	M4
MASA (G)	0,202	0,206	0,206	0,205	0,204
LEC. INCIAL (ML)	5,6	12	7,2	4,8	5,4
LEC. FINAL (ML)	80,2	85,2	77,2	77	78,4
VOLUMEN (ML)	74,6	73,2	70	72,2	73
CALCIMETRÍA (%)		**96,218**	**92,011**	**95,366**	**96,895**

Tabla 6.11: % $CaCO_3$ de Aleros Oscuros (131120-4-1)

- Aleros Amarillos (131120-4-2):

MUESTRA	M1C	M1	M2	M3
MASA (G)	0,205	0,203	0,206	0,203
LEC. INCIAL (ML)	5	6	6	5
LEC. FINAL (ML)	85,4	84	83	83,4
VOLUMEN (ML)	80,4	78	77	78,4
CALCIMETRÍA (%)		**97,970**	**95,306**	**98,473**

Tabla 6.12: % $CaCO_3$ de Aleros Amarillos (131120-4-2)

Como el carbonato cálcico es el principal componente de la caliza, un resultado alto de porcentaje de $CaCO_3$ presente en el árido indica una predominancia de composición caliza. Es eso lo que ocurre en los áridos de Gran Parada y Rambla Orica donde se obtienen valores de entre 75-85% aproximadamente, mientras que en los J. Abarca, Aleros Oscuros y Aleros Amarillos existe un mayor porcentaje de carbonato cálcico, alcanzando valores por encima del 90%. Ello refleja que todas las muestras de árido suministradas se corresponden con áridos que son prácticamente calizos.

La roca caliza es muy común, abundante y económica en los procesos de trituración, por lo que será ideal para su empleo en mezclas asfálticas, debido que no presentan problemas de adhesividad, es decir, de afinidad con los ligantes asfálticos. Por ello se suelen emplear en todas las capas de los firmes, a excepción de algunos casos en los que se requiera para un uso como agregado grueso en las capas de rodadura, debido a la facilidad que tiene de pulimentarse en condiciones de servicio. En el caso de este proyecto no supondrá ningún problema esta debilidad al pulimiento ya que el tráfico ferroviario irá soportado por los carriles y nunca habrá contacto directo entre la rueda y la superficie de la mezcla asfáltica.

6.3. Resultados de la resistencia a la fragmentación. Ensayo de los Ángeles

Debido a que este ensayo se ha realizado una vez sobre cada muestra de árido, se ha decidido ensayar todas las muestras para obtener un resultado lo más correcto posible.

En la toma de resultados, el significado de cada apartado es el siguiente:

- M (10/12,5): Corresponde a la masa de árido que pasa por el tamiz 12,5 mm y queda retenido por el tamiz 10 mm. Como bien se ha comentado anteriormente en el apartado [5.3.3. Resistencia a la fragmentación. Ensayo de los Ángeles], esta fracción granulométrica debe ser entre el 60% y el 70% del árido total a ensayar.
- M (12,5/14): Masa de árido que pasa por el tamiz 14 mm y queda retenido por el tamiz 12,5 mm.

- M_{Total}: Suma de M (10/12,5) y M (12,5/14), la cual debe ser de 5 Kg según la norma UNE-EN 1097-2.
- M (> 1,6): Masa retenida por el tamiz 1,6 mm una vez realizado el ensayo dentro del tambor giratorio. Esta masa será la utilizada para el cálculo del coeficiente LA.
- LA: Coeficiente de los Ángeles.

En la tabla expuesta a continuación se muestran las medidas tomadas durante la ejecución del ensayo, además de los resultados del valor del coeficiente de Los Ángeles (LA) obtenido:

	Gran Parada	Rambla Orica		J. Abarca		Aleros Oscuros	Aleros Amarillos
Código	131023-1-1	131023-2-1	131023-2-2	131023-3-1	131023-3-2	131120-4-1	131120-4-2
M (10/12,5)	3300	3290	3280	3415	3330	3230	3500
M (12,5/14)	1700	1710	1720	1585	1670	1770	1500
M_{Total}	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000
M (>1,6)	2550	2890	2725	3645	3720	3235	2360
LA	49	42,2	45,5	27,1	25,6	35,3	52,8

Tabla 6.13: Valor del coeficiente de Los Ángeles de todas las muestras de árido

Los áridos J. Abarca (131023-3-1/ 131023-3-2) han obtenido en este ensayo resultados más o menos aceptables que los hacen validos según el PG-3 para capas de base y tráficos menores de T2 como se puede observar en la tabla inferior.

TIPO DE CAPA	CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO				
	T00 y T0	T1	T2	T3 y arcenes	T4
RODADURA	≤20			≤25	
INTERMEDIA	≤25				≤25(*)
BASE	≤25		≤30		

(*) En vías de servicio

Tabla 6.14: PG-3 Tabla 542.4 - Coeficiente de los ángeles del árido grueso

Por otra parte, los áridos Gran Parada (131023-1-1), Rambla Orica (131023-2-1/ 131023-2-2) y Aleros Amarillos (131120-4-2) según los resultados obtenidos en el ensayo de los Ángeles y en comparación con la tabla superior, su uso en cualquiera de las capas de firme y para cualquier tipo de tráfico resulta imposible al no cumplir con las exigencias impuestas por la normativa. Hay que recordar que tal y como se explicó anteriormente en el apartado [2.3. Justificación], no existe normativa que defina las características que deben tener las mezclas bituminosas utilizadas para tráfico ferroviario. Por ello se utiliza la normativa de carreteras intentando relacionar las exigencias de éstas con las solicitaciones de las líneas ferroviarias. Como en este caso es obvio que los valores de tráfico de carretera no tienen demasiado que ver con los ferroviarios, no se puede definir una categoría de tráfico pesado para este trabajo. Aun así se tomarán los valores de la [Tabla 6.14] de manera aproximada y se buscará para este trabajo de investigación que los áridos tengan un Coeficiente de los Ángeles inferior a 25.

Finalmente, la muestra perteneciente a Aleros Oscuros (131120-4-1) se podría estabilizar y llegar a proporcionar características de resistencia adecuadas con procesos posteriores. Por lo tanto, se seguirá estudiando teniendo en cuenta su posible utilización siempre y cuando ensayos posteriores así lo permitan.

Como conclusión de este ensayo, los áridos que han conseguido acercarse a las exigencias expuestas en la [Tabla 6.14] son los J. Abarca y los Aleros Oscuros. Aunque ambos no han alcanzado unos resultados óptimos al no obtener un Coeficiente de los Ángeles inferior a 25, sus resultados se acercan a lo exigido, sobre todo los J. Abarca son los que mayor resistencia a la fragmentación han tenido. Por tanto se pueden llevar a cabo mezclas de estos áridos con otros de mayor calidad para conseguir cumplir con los requerimientos impuestos por la normativa.

6.4. Resultados de la granulometría de las partículas (áridos)

En el Ensayo de los Ángeles, resuelto en el apartado anterior, se demostró que los áridos que pueden cumplir con las especificaciones del PG-3 son los J. Abarca y los Aleros Oscuros. Por ello se ha procedido a ensayar sólo esos dos tipos de áridos. En este caso, se ha incorporado otra muestra de J. Abarca (131120-3-3) que aunque su código sea diferente se corresponde al mismo tipo de árido y sólo varía en que se recogió en otro lugar de la escombrera.

En la toma de resultados, el significado de cada apartado es el siguiente:

- Masa (gr): Se refiere a la masa retenida por el tamiz.
- % Retenido: Corresponde al porcentaje de árido retenido por el tamiz con respecto al total de muestra ensayada.
- % Pasa: Es el porcentaje de árido que pasa por el tamiz con respecto al total de muestra ensayada.

En las tablas expuestas a continuación se muestran las medidas tomadas durante la ejecución del ensayo, además de los resultados de la curva granulométrica obtenida:

- J. Abarca (131120-3-3):

TAMIZ	MASA (gr)	% RETENIDO	% PASA
16	8290	81,3765017	18,62349831
8	1665	16,3440139	2,279484405
4	0,802	0,00787261	2,271611793
2	214,5	2,10558017	0,166031622
1	2,069	0,02030977	0,145721854
0,5	1,672	0,01641273	0,129309126
0,25	1,295	0,01271201	0,116597115
0,125	2,263	0,02221412	0,094382999
0,063	4,902	0,04811913	0,046263866
<0,063	4,713	0,04626387	0
TOTAL	10187,216		

Tabla 6.15: Análisis granulométrico de J. Abarca (131120-3-3)

- Aleros Oscuros (131120-4-1):

TAMIZ	MASA (KG)	% RETENIDO	% PASA
16	0,185	1,69755919	98,30244081
8	6,145	56,3864929	41,91594788
4	1,97	18,0767113	23,83923656
2	0,895	8,21251606	15,6267205
1	0,5	4,5879978	11,0387227
0,5	0,275	2,52339879	8,515323913
0,25	0,225	2,06459901	6,450724904
0,125	0,345	3,16571848	3,285006423
0,063	0,213	1,95448706	1,330519361
<0,063	0,145	1,33051936	0
TOTAL	10,898		

Tabla 6.16: Análisis granulométrico de Aleros Oscuros (131120-4-1)

Estos resultados muestran que en el caso de los J. Abarca se tiene una granulometría concentrada en los tamaños mayores a 8 mm. Esto se debe a que dichos áridos, en su estado natural, se encuentran, en su mayor parte, en tamaños comprendidos entre 8 mm y 32 mm, por lo que para su empleo en las mezclas asfálticas será adecuado siempre y cuando se lleve a cabo una reducción de los tamaños de las partículas en la machacadora de mandíbulas o en cualquier otro aparato que reduzca el árido a tamaños inferiores a 8 mm. De esta manera se puede crear una curva granulométrica dentro de los husos establecidos por la normativa para cada tipo de mezcla asfáltica (ver figuras 5.3 y 5.5 del apartado [5.2.5. Mezclas asfálticas]).

En el caso de los Aleros Oscuros, se ve una distribución mayor de las distintas fracciones granulométricas, con respecto a los J. Abarca. En cambio, existe también una mayor parte de partículas en la fracción granulométrica comprendida entre 8 mm y 16 mm.

6.5. Resultados de la forma de las partículas. Coeficiente de forma

En las tablas expuestas a continuación se muestran las medidas tomadas durante la ejecución del ensayo, además de los resultados del valor del coeficiente de forma (SI) obtenido:

MUESTRA	J. ABARCA		ALEROS OSCUROS
CÓDIGO	131120-3-3	131120-3-3	131120-4-1
FRACCION	16/32	8/16	8/16
L/E<3	6980	1245	238,171
L/E>3	1295	415	61,38
TOTAL	8275	1660	299,551
SI	15,6495468	25	20,4906677

Tabla 6.17: Coeficiente de forma de J. Abarca y Aleros Oscuros

En el apartado [5.3.5.] donde se explicaba el significado del coeficiente de forma, se llegó a la conclusión de que la existencia una gran proporción de partículas cúbicas (L/E < 3) era beneficioso en cuanto a la resistencia que luego estos áridos aportarían a la mezcla, además de elevar la vida útil del firme. En cambio, la existencia de una gran proporción de partículas no cúbicas (L/E > 3) podía resultar muy negativo para la mezcla. En concreto, un coeficiente de forma mayor a 30%, según [26], resulta inadecuado para que dichos árido sean empleados en mezclas bituminosas.

Como conclusión, por lo que podemos observar de los resultados obtenidos, los áridos J. Abarca y Aleros Oscuros son adecuados para su empleo en mezclas bituminosas según determina su coeficiente de forma. Ello es debido a que al tener un coeficiente de forma menor al 30% significa que la proporción de partículas no cúbicas es pequeña con respeto al total de partículas de la muestra de árido.

6.6. Resultados de la resistencia a ciclos de hielo y deshielo

Las muestras ensayadas son los Aleros Oscuros (131120-4-1) y J. Abarca (131120-3-3). Estos áridos son los que han superado las exigencias de la normativa en cada uno de los

ensayos hasta ahora, en cuanto a su empleo en mezclas bituminosas. Es por lo que son los dos áridos a los que se les continúa realizando ensayos.

En las tablas expuestas a continuación se muestran las medidas tomadas durante la ejecución del ensayo, además de los resultados del valor del porcentaje de pérdida de masa, como resultado del ensayo de hielo y deshielo, obtenido:

- J. Abarca (131120-3-3):

MUESTRA	M1 (gr)	M2 (gr)	% PERDIDA
1	445	434,2	2,427
2	475	464,7	2,168
3	485	476,6	1,732

Tabla 6.18: Ensayo ciclos hielo-deshielo para J. Abarca (131120-3-3)

- Aleros Oscuros (131120-4-1):

MUESTRA	M1 (gr)	M2 (gr)	% PERDIDA
1	510	507,8	0,431
2	520	518,7	0,250
3	509	507,3	0,334

Tabla 6.19: Ensayo ciclos hielo-deshielo para Aleros Oscuros (131120-4-1)

Los resultados arrojados por las tablas anteriores [Tabla 6.18 y Tabla 6.19] muestran que los áridos ensayados J. Abarca (131120-3-3) y Aleros Oscuros (131120-4-1), no son susceptibles de alteraciones que puedan provocar cambios severos bajo la alteración por los cambios rápidos de temperatura. De hecho en el J. Abarca no se supera el 2,5% [Tabla 6.18] de pérdida de masa, lo que constituye un valor muy pequeño de árido alterado con respecto al total de la muestra. Y los resultados de los Aleros Oscuros revelan un mejor comportamiento ante el hielo-deshielo que los áridos anteriores, ya que su porcentaje de pérdida de masa no supera el 0,5% del total de muestra [Tabla 6.19].

Por tanto, dichos áridos son adecuados para su empleo en mezclas bituminosas, conservando sus propiedades de resistencia en la mezcla ante cambios cíclicos severos de la temperatura, contribuyendo además en evitar el envejecimiento prematuro de la capa, tal y como se explicó en el apartado [5.3.6].

6.7. Resultados de las densidades, coeficiente de absorción y contenido de agua del árido grueso

En la toma de resultados, el significado de cada apartado es el siguiente:

- M: Masa de la muestra con su contenido en agua tal como viene.
- M´s: Masa seca sin lavado previo de la muestra tal como viene.
- Ms: Masa seca de la muestra determinada en el aire.
- Ma: Masa de la muestra embebida determinada en el aire.
- M´a: Masa de la muestra embebida determinada en el agua.

En las tablas expuestas a continuación se muestran las medidas tomadas durante la ejecución del ensayo, además de los resultados de los valores de los parámetros obtenidos:

MUESTRA	J. ABARCA
CÓDIGO	131120-3-3
M (Kg)	1,210
M´s (Kg)	1,210
Ms (Kg)	2,4921
Ma (Kg)	2,5221
M´a (Kg)	1,5394
dr (Mg/m^3)	2,536
drsss (Mg/m^3)	2,567
A_ρ (%)	1,204
h (%)	0

Tabla 6.20: Determinación de parámetros del J. Abarca (131120-3-3)

MUESTRA	ALEROS OSCUROS
CÓDIGO	131120-4-1
M (Kg)	1,510
M´s (Kg)	1,500
Ms (Kg)	2,5221
Ma (Kg)	2,8114
M´a (Kg)	1,5898
dr (Mg/m^3)	2,065
drsss (Mg/m^3)	2,301
A_ρ (%)	11,472
h (%)	0,67

Tabla 6.21: Determinación de parámetros de los Aleros Oscuros (131120-4-1)

Conociendo el contenido de agua o la cantidad de absorción de agua que pueden experimentar los áridos, permite ayudar a realizar predicciones de los cambios volumétricos posibles (hinchamientos o asentamientos).

En relación a los dos suelos ensayados, en una primera comparación se puede apreciar que el que tiene unas mejores propiedades es el J. Abarca debido a que su contenido de humedad inicial es del 0% en comparación con los Aleros Oscuros que es del 0,67%. Además, el coeficiente de absorción del agua en el J. Abarca es muy pequeño mientras que en el otro árido es bastante mayor. Esto va a influir en que la densidad real saturada pero con la superficie seca (drsss) de los Aleros Oscuros es considerablemente mayor a su densidad real (dr), mientras que en el J. Abarca la variación de densidades es menor. Por tanto, las mejores propiedades son las del J. Abarca ya que interesa que el árido utilizado no sea muy absorbente para evitar la reacción del agua con el ligante bituminoso o con otros componentes de la mezcla bituminosa que pueda ocasionar notables efectos adversos como la fluencia de la capa, entre otros.

6.8. Resultados del coeficiente de absorción del árido fino

Tan sólo se va a realizar el ensayo con una muestra de árido J. Abarca (131120-3-3), ya que según los resultados obtenidos en el apartado anterior, los J. Abarca son los que disponen de una humedad inicial nula y un coeficiente de absorción menor a los Aleros Oscuros. Por lo que de cara a su utilización en mezclas bituminosas se ha demostrado que los J. Abarca cumplen por ahora con las exigencias impuestas por la normativa.

En las tablas expuestas a continuación se muestran las medidas tomadas durante la ejecución del ensayo, además de los resultados del valor del coeficiente de absorción del árido fino obtenido:

MUESTRA	J. ABARCA
Código	131120-3-3
Tara (g)	34,247
Tara + Suelo + Agua (g)	61,197
Tara + Suelo (g)	60,852
Coeficiente de Absorción (%)	1,296

Tabla 6.22: Coeficiente de Absorción del árido fino J. Abarca (131120-3-3)

Los resultados mostrados en la tabla anterior [Tabla 6.22], reflejan un coeficiente de absorción del árido fino reducido, lo que significa que la fracción granulométrica fina de los áridos J. Abarca absorbe poca cantidad de agua en relación a su peso. Esto es beneficioso de cara a emplear los áridos en mezclas bituminosas por los motivos que fueron expuestos en el apartado anterior [6.7], donde se comentaba que la presencia de una gran proporción de agua en los áridos podía ocasionar la reacción de ésta con el ligante bituminoso o con otros componentes de la mezcla bituminosa, pudiendo provocar la fluencia de capa.

Como conclusión, los áridos J. Abarca cumplen con las exigencias, ya que tanto en las fracciones gruesas como en las finas tienen un coeficiente de absorción pequeño, con valores entre el 1,2% y 1,3%.

6.9. Resultados de la limpieza superficial del árido grueso

Tan sólo se ha optado por ensayar el árido J. Abarca (131120-3-3) debido a que es el que presenta hasta ahora unas mejores propiedades para su utilización en capas asfálticas.

En la tabla expuesta a continuación se muestran las medidas tomadas durante la ejecución del ensayo, además de los resultados del valor del coeficiente de limpieza superficial obtenido:

MUESTRA	J. ABARCA
CÓDIGO	131120-3-3
M_{1s} (kg)	1,500
M_{1h} (kg)	1,510
m (kg)	1,345
M_h (kg)	1,370
I_s	0,993
M_s (kg)	1,361
Impurezas (kg)	0,016
Coef. Limpieza Sup. (%)	1,17

Tabla 6.23: Coeficiente de limpieza superficial de J. Abarca (131120-3-3)

El contenido de impurezas del J. Abarca es bajo. De hecho el PG-3 establece que el contenido de impurezas del árido grueso deberá ser inferior al 0,5%. Si se observan los resultados de la tabla anterior [Tabla 6.23], se llega a la conclusión de que el árido J.

Abarca cumple con las exigencias del PG-3 sobre el contenido de impurezas del árido grueso.

PARTE 2: RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LOS FILLERS

6.10. Resultados del análisis granulométrico por tamizado del polvo mineral (filler)

En la toma de resultados, el significado de cada apartado es el siguiente:

- Tara: peso en gramos del recipiente que contiene la muestra de filler.
- T+S: peso en gramos de la tara más la muestra de filler.
- S: peso en gramos de la muestra de polvo mineral.
- %: porcentaje de polvo mineral que queda retenido en la fracción granulométrica correspondiente.
- % Pasa: porcentaje de polvo mineral que pasa por el tamiz más pequeño de la fracción granulométrica correspondiente.

En las tablas expuestas a continuación se muestran las medidas tomadas durante la ejecución del ensayo, además de los resultados del análisis granulométrico del polvo mineral:

- Filler A:

TAMAÑO	> 0,5	0,25/0,5	0,063/0,25	<0,063
TARA (g)	22,407	21,329	36,122	
T+S (g)	22,794	23,789	56,809	
S (g)	0,387	2,46	20,687	76,466
%	0,387	2,46	20,687	76,466
% PASA	99,613	97,153	76,466	

Tabla 6.24: Análisis granulométrico del Filler A

- Filler B:

TAMAÑO	> 0,5	0,25/0,5	0,063/0,25	<0,063
TARA (g)		43,069	58,738	
T+S (g)		47,073	77,169	
S (g)		4,004	18,431	77,565
%	0	4,004	18,431	77,565
% PASA	100	95,996	77,565	

Tabla 6.25: Análisis granulométrico del Filler B

Tal y como se especifica en el PG-3 y en la norma UNE-EN 13043, el 100% de los resultados de análisis granulométrico deben quedar dentro del huso granulométrico general definido en la tabla 542.8 del PG-3.

Adicionalmente, el 90% de los resultados de análisis granulométricos basados en los últimos veinte valores obtenidos, deben quedar incluidos dentro de un huso granulométrico más estrecho, cuyo ancho máximo en los tamices correspondientes a 0,125 y 0,063 mm no supere el 10%.

ABERTURA DEL TAMIZ (mm)	Huso granulométrico general para resultados individuales. Cernido acumulado (% en masa)	Ancho máximo del huso restringido (% en masa)*
2	100	-
0,125	85 a 100	10
0,063	70 a 100	10
* El intervalo granulométrico declarado se basa en los últimos 20 valores obtenidos. El 90% de los resultados declarados deben quedar incluidos dentro de este intervalo, y todos los resultados obtenidos deben quedar dentro del intervalo granulométrico general.		

Tabla 6.26: Tabla 542.8 (PG-3) – Especificaciones para la granulometría del polvo mineral

Los resultados obtenidos en los ensayos de los dos fillers muestran que ambos cumplen con una granulometría dentro del huso granulométrico definido anteriormente, por lo que cumple con el PG-3 y con la norma UNE-EN 13043.

6.11. Resultados del Límite Líquido y Plástico y del Índice de Plasticidad

En la toma de resultados, el significado de cada apartado es el siguiente:

- T+S+A (g): es el peso en gramos de la tara con el suelo húmedo.
- T+S (g): es el peso en gramos de la tara con el suelo seco.
- S (g): es el peso sólo del suelo seco.
- A (g): es el peso del agua contenida en el suelo húmedo.
- H (%): es el porcentaje correspondiente a la humedad presente en la muestra de suelo húmedo.

En las tablas expuestas a continuación se muestran las medidas tomadas durante la ejecución del ensayo, además de los resultados del valor del Límite Líquido (LL), Límite Plástico (LP) así como del Índice de Plasticidad (IP) obtenido:

- Filler A:

	LÍMITE LÍQUIDO			LÍMITE PLÁSTICO		
MUESTRA	1	2	3	4	5	6
Nº GOLPES	17	27	25	-	-	-
TARA (g)	22,828	22,406	36,258	21,244	22,726	22,828
T+S+A (g)	27,53	29,729	41,32	26,028	27,809	25,863
T+S (g)	26,637	28,458	40,447	25,351	27,079	25,424
S (g)	3,809	6,052	4,189	4,107	4,353	2,596
A (g)	0,893	1,271	0,873	0,677	0,73	0,439
H (%)	23,444	21,001	20,840	16,484	16,770	16,910
LÍMITES	**LL = 21,489**			**LP = 16,721**		
ÍNDICE DE PLASTICIDAD = 4,768						

Tabla 6.27: Determinación del LL, LP e IP del Filler A

- Filler B:

	LÍMITE LÍQUIDO				LÍMITE PLÁSTICO	
MUESTRA	1	2	3	4	5	6
N GOLPES	18	27	19	27	-	-
TARA	22,926	21,442	21,177	21,41	22,726	22,828
T+S+A	29,732	28,758	27,016	28,539	27,809	25,863
T+S	28,495	27,543	25,944	27,342	27,079	25,424
S	5,569	6,101	4,767	5,932	4,353	2,596
A	1,237	1,215	1,072	1,197	0,73	0,439
H (%)	22,212	19,915	22,488	20,179	16,770	16,910
LIMITES	**LL = 20,589**				**LP = 17,877**	
ÍNDICE DE PLASTICIDAD = 2,712						

Tabla 6.28: Determinación del LL, LP e IP del Filler B

Según [28], el filler mineral deberá consistir de material fino tal como polvo de piedras calizas u otro material disponible. Al momento de usarlo éste deberá estar lo suficientemente seco para fluir libremente, especialmente para que no forme aglomeraciones. El filler debe estar libre de impurezas orgánicas y tener un índice de plasticidad menor a 4, para que las características de los mismos sean útiles y no perjudiquen a la mezcla asfáltica final. Por lo tanto, a la vista de los resultados expuestos anteriormente, se puede concluir que el Filler B es apto para su empleo en la mezcla asfáltica.

6.12. Resultados de la densidad aparente del filler en Tolueno

En las tablas expuestas a continuación se muestran las medidas tomadas durante la ejecución del ensayo, además de los resultados del valor de la densidad aparente del filler en Tolueno obtenido:

- Filler A:

MUESTRA	1	2	3	4
MASA G	10,028	10,026	10,028	10,029
V ML	16	16	16	17
DEN MG/M3	0,627	0,627	0,627	0,590

Tabla 6.29: Determinación de la densidad aparente del Filler A en Tolueno

- Filler B:

MUESTRA	1	2	3	4
MASA G	10,033	10,053	10,033	10,065
V ML	16	17	16	16
DEN MG/M3	0,627	0,591	0,627	0,629

Tabla 6.30: Determinación de la densidad aparente del Filler B en Tolueno

Según lo establecido en el PG-3 y la NLT-176, la densidad aparente del polvo mineral deberá estar comprendida entre cinco y ocho decigramos de centímetro cúbico (0,5 a 0,8 g/cm^3).

Como se puede observar en las dos tablas anteriores, los dos fillers ensayados cumplen con la densidad aparente en Tolueno establecida por el PG-3, lo que se corresponde con una actividad de adhesividad media adecuada para su utilización en mezclas bituminosas, tal y como se mencionó anteriormente en el apartado [5.3.12].

6.13. Resultados Calcimetría de Bernard (fillers)

En la toma de resultados, el significado de cada apartado es el siguiente:

- M1C: Corresponde con la muestra realizada con el carbonato cálcico puro para calibrar el aparato.
- M1, M2, M3 y M4: Son las muestras de filler a las que han sido realizadas el ensayo.

En las tablas expuestas a continuación se muestran las medidas tomadas durante la ejecución del ensayo, además de los resultados del valor del porcentaje de carbonato cálcico obtenido:

- Filler A:

MUESTRA	M1C	M1	M2	M3	M4
MASA (G)	0,202	0,207	0,207	0,206	0,207
LEC. INICIAL (ML)	5,4	5,2	5,6	5,2	7,6
LEC. FINAL (ML)	87,6	82,4	80,8	77	80,2
VOLUMEN (ML)	82,2	77,2	75,2	71,8	72,6
CALCIMETRÍA (%)		**91,649**	**89,274**	**85,652**	**86,188**

Tabla 6.31: % $CaCO_3$ de Filler A

- Filler B:

MUESTRA	M1C	M1	M2	M3	M4
MASA (G)	0,202	0,206	0,206	0,205	0,204
LEC. INICIAL (ML)	5,6	12	7,2	4,8	5,4
LEC. FINAL (ML)	80,2	85,2	77,2	77	78,4
VOLUMEN (ML)	74,6	73,2	70	72,2	73
CALCIMETRÍA (%)		**96,218**	**92,012**	**95,367**	**96,896**

Tabla 6.32: % $CaCO_3$ de Filler B

De manera similar a como se comentó anteriormente en el apartado [6.2. Resultados Calcimetría de Bernard (áridos)], como el carbonato cálcico es el principal componente de la caliza, un resultado alto de porcentaje de $CaCO_3$ presente en el filler indica una

predominancia de composición caliza. Es lo que ocurre con las muestras ensayadas, donde en el Filler A se obtienen valores de porcentaje de carbonato cálcico en torno a 85-92%, mientras que en el Filler B existe aún más porcentaje de carbonato cálcico, tomando valores entre 92-97%. Visualmente se aprecia la mayor cantidad de carbonato cálcico presente en el Filler B debido a que presenta un color más blanquecino que el Filler A.

Como se ha llegado a la deducción de la elevada pureza de las muestras en contenido de carbonato cálcico, se puede concluir que ambos fillers son adecuados para su empleo en mezclas bituminosas según los resultados de este ensayo. Además, al tener una composición muy caliza, dispondrán de buenas características de adhesividad lo que servirá para asociarse de la mejor manera con el betún evitando el escurrimiento de éste, tal y como se explicó en el apartado [5.2.2. Filler].

6.14. Resultados del contenido en agua por secado en estufa

En la toma de resultados, el significado de cada apartado es el siguiente:

- M_2: Corresponde a la masa de las bandejas limpias y secas.
- M_1: Masa de la muestra de ensayo (restando el peso de la bandeja M_2).
- M_3: Masa constante de la muestra seca de ensayo.
- M_{d1}: Masa de la muestra seca de ensayo enfriada a temperatura ambiente y descontando el peso de la bandeja.
- M_{di}: Masa de la muestra seca de ensayo enfriada a temperatura ambiente y descontando el peso de la bandeja. Se corresponde con la segunda medida en la que la muestra de ensayo se ha vuelto a meter en la estufa durante una hora después de haber sido enfriada a temperatura ambiente. Una vez cogida la masa se compara con la medida anterior M_{d1} y se comprueba si ambas medidas no difieren en más del 0,1% en masa. Si la diferencia es menor a 0,1% ya se ha obtenido la masa constante M_3, si no se siguen realizando medidas hasta que dos consecutivas difieran menos del 0,1%.

En las tablas expuestas a continuación se muestran las medidas tomadas durante la ejecución del ensayo, además de los resultados del valor del contenido de agua:

- Filler A:

MUESTRA	1	2
M2 (g)	35,774	52,35
M1 (g)	24,502	24,014
MD1 (g)	24,442	23,956
MDi (g)	24,419	23,931
ERROR (%)	0,094	0,104
M3 (g)	24,419	23,931
W (%)	0,340	0,347
MEDIA (%)	0,343	

Tabla 6.33: Contenido en agua del Filler A por secado en estufa

- Filler B:

MUESTRA	3	4
M2 (g)	38,97	43,701
M1 (g)	23,863	23,628
MD1 (g)	20,459	20,192
MDi (g)	20,454	20,183
ERROR (%)	0,024	0,045
M3 (g)	20,454	20,183
W (%)	16,667	17,069
MEDIA (%)	16,868	

Tabla 6.34: Contenido en agua del Filler B por secado en estufa

Con los resultados obtenidos se muestra claramente un mayor contenido en agua del Filler B con respecto al Filler A. Esto quiere decir que la humedad natural del Filler B es relativamente alta, lo que se ha podido comprobar en la realización de los ensayos debido a que era difícil de tamizar ya que se apelmazaba fácilmente. Este problema se ha conseguido solucionar mediante un proceso de desmenuzado.

6.15. Resultados de la densidad real del filler. Método del Picnómetro

En las tablas expuestas a continuación se muestran las medidas tomadas durante la ejecución del ensayo, además de los resultados de la densidad real del filler obtenido por el método del picnómetro:

- Filler A:

MUESTRA	1	2	AGUA
M0 (G)	43,389	43,343	
M1 (G)	53,390	53,342	
M2 (G)	112,341	112,228	
M3 (G)	106,312	106,266	
V (ML)	63,108	63,108	
D (MG/M3)	2,512	2,470	0,99707

Tabla 6.35: Densidad real del Filler A por el método del picnómetro

- Filler B:

MUESTRA	1	2	AGUA
M0 (G)	43,341	43,341	
M1 (G)	53,362	53,360	
M2 (G)	112,261	112,227	
M3 (G)	106,052	106,052	
V (ML)	62,895	62,895	
D (MG/M3)	2,621	2,600	0,99707

Tabla 6.36: Densidad real del Filler B por el método del picnómetro

Con estos resultados se puede observar que el filler con una mayor densidad real es el Filler B. El conocimiento de las densidades de los componentes de la mezcla bituminosa va a permitir el cálculo de la densidad de dicha mezcla.

PARTE 3: RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LAS PROBETAS

6.16. Resultados de las densidades, contenido de huecos, estabilidad, deformación y escurrimiento del ligante

Se estudiaron varias mezclas, con la colaboración de un laboratorio de Corvisa, para determinar una fórmula de trabajo que cumpliese especificaciones utilizando el árido procedente de la escombrera privada.

En las tablas que se muestran a continuación, queda determinada la granulometría de la materia mineral y los resultados del estudio Marshall, realizados a probetas con distinta proporción de ligante para determinar cuál será la fórmula de trabajo que más se adecúe a las exigencias, cumpliendo con la normativa (primero se mostrarán los resultados de la mezcla SMA 11 y después de la AC 22 S):

GRANULOMETRÍA SMA 11									
TAMICES	31,5	22,4	16	11,2	8	4	2	0,5	0,063
LÍM. SUPERIOR	100	100	100	100	80	33	30	20	10
LÍM. INFERIOR	100	100	100	90	55	22	20	12	6
GRANULOMETRÍA	100	100	100	94	68	28	22	15	7,8

Tabla 6.37: Granulometría de la SMA 11

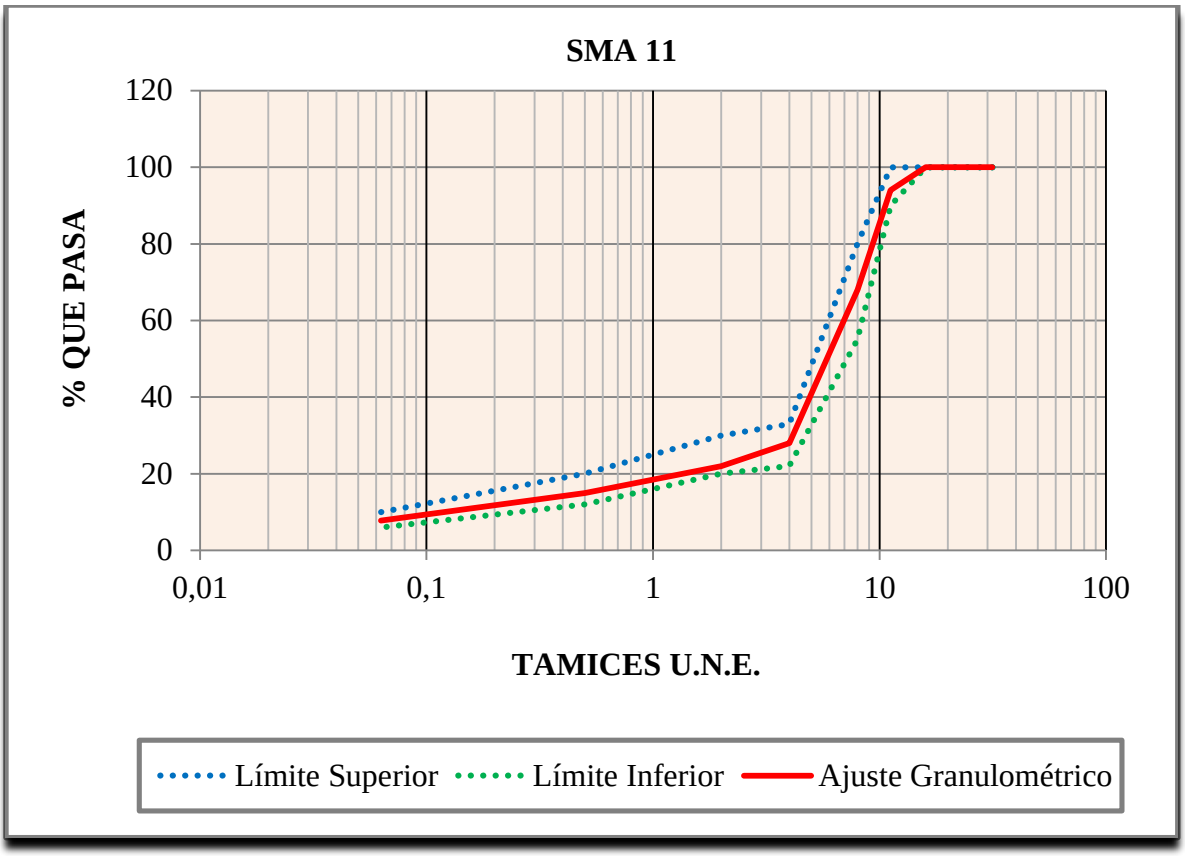


Figura 6.1: Huso granulométrico y Curva granulométrica SMA 11

% LIGANTE S/M.	4,7	5,5	6,3	6,8	7,3
DENSIDAD (g/cm3)	2,363	2,366	2,370	2,394	2,397
ESTABILIDAD (Kg)	1045	1079	1366	1720	1566
DEFORMACIÓN (mm)	3,4	3,5	4	4,2	4,5
HUECOS MEZCLA (%)	5,7	4,5	3,2	1,5	0,7
HUECOS RELLENOS (%)	65,1	73,5	81,6	91,2	96
HUECOS ÁRIDOS (%)	16,4	17,0	17,60	17,2	17,1

Tabla 6.38: Estabilidad, Deformación y % de Huecos en la SMA 11

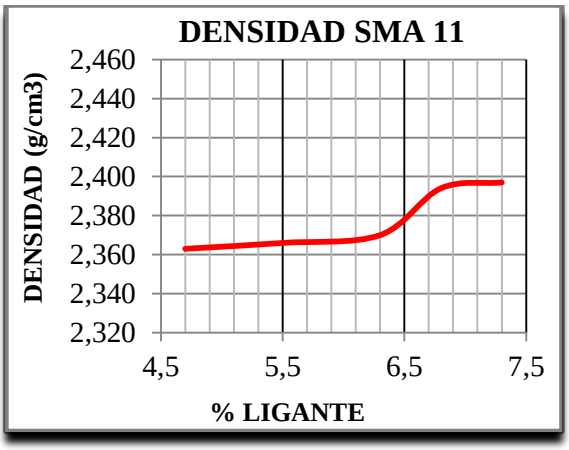


Figura 6.2: Gráfico Densidad SMA 11

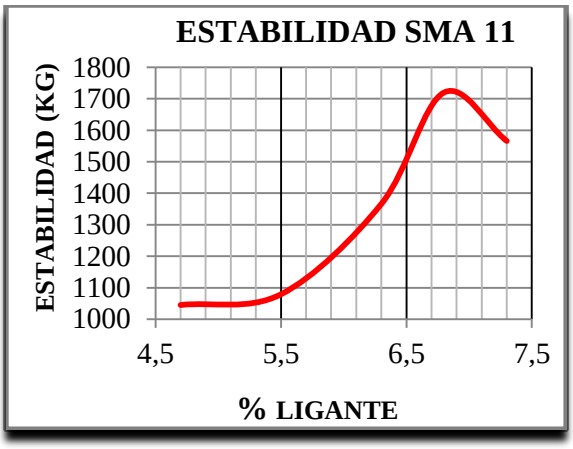


Figura 6.3: Gráfico Estabilidad SMA 11

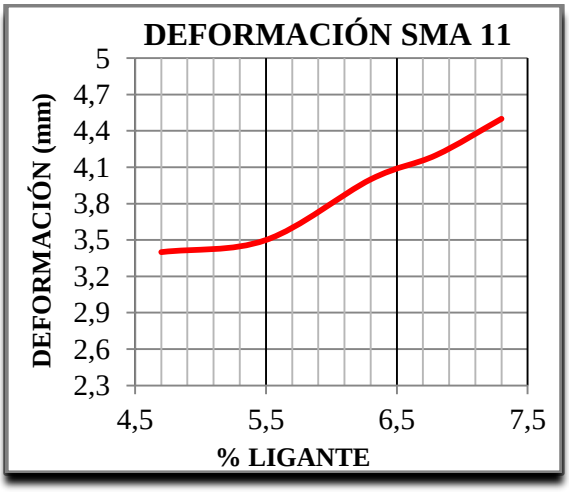


Figura 6.4: Gráfico Deformación SMA 11

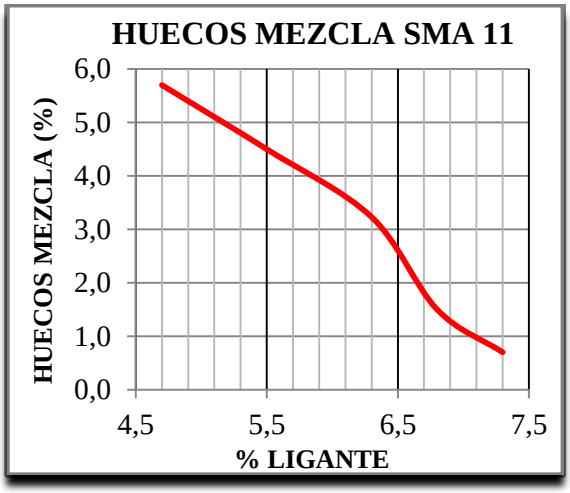


Figura 6.5: Gráfico Huecos Mezcla SMA 11

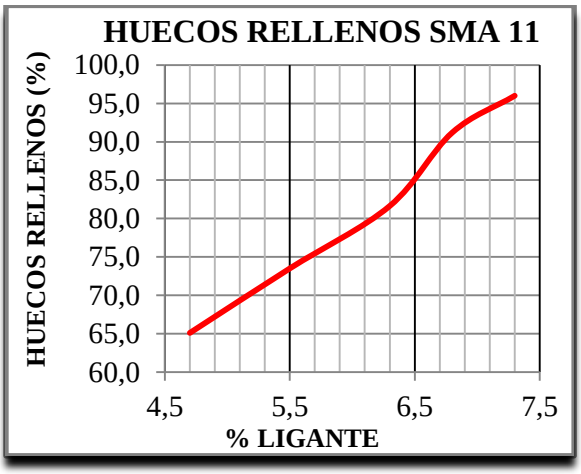


Figura 6.6: Gráfico Huecos Rellenos SMA 11

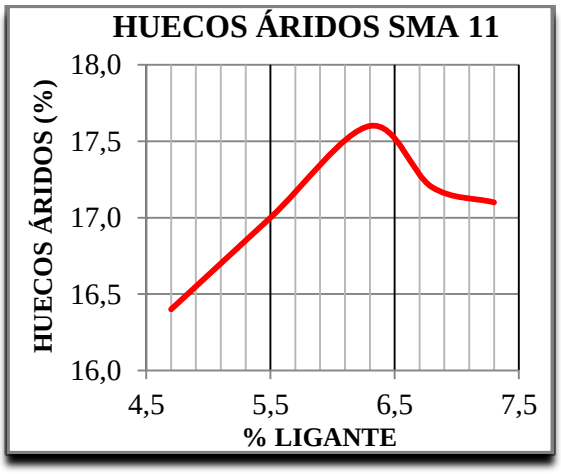


Figura 6.7: Gráfico Huecos Áridos SMA 11

A continuación, los resultados de los ensayos realizados sobre la mezcla AC 22 S:

GRANULOMETRÍA AC 22 S									
TAMICES	32	22	16	8	4	2	0,5	0,25	0,063
LÍM. SUPERIOR	100	100	88	66	50	38	21	15	7
LÍM. INFERIOR	100	90	70	50	35	24	11	7	3
GRANULOMETRÍA	100	98	82	62	40	27	17	12	5

Tabla 6.39: Granulometría AC 22 S

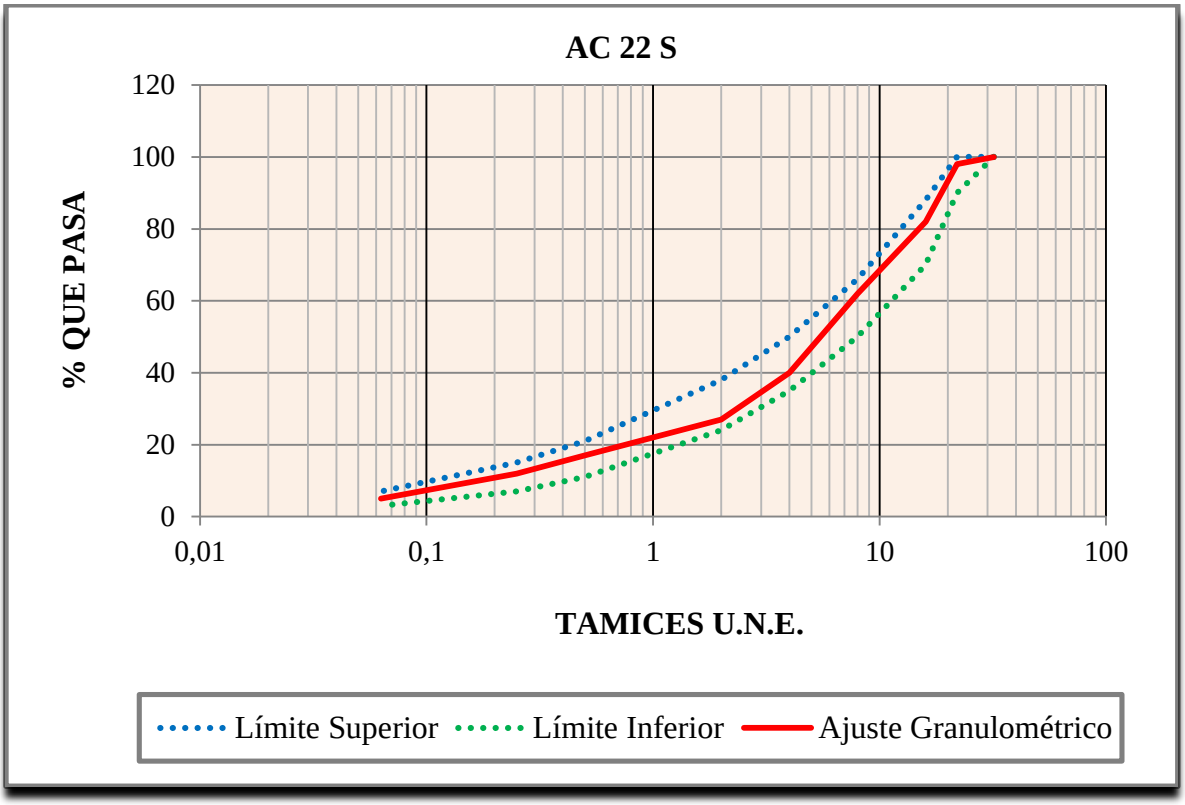


Figura 6.8: Huso granulométrico y Curva granulométrica AC 22 S

% LIGANTE S/M.	3,5	4	4,5	5	5,5
DENSIDAD (g/cm3)	2,407	2,436	2,465	2,473	2,472
ESTABILIDAD (Kg)	1235	1293	1274	1052	987
DEFORMACIÓN (mm)	3,2	3,8	4,1	4,8	5,6
HUECOS MEZCLA (%)	7,2	5,3	3,4	2,4	2,2
HUECOS RELLENOS (%)	53,1	63,7	75,6	83,2	85,7
HUECOS ÁRIDOS (%)	15,3	14,7	14,10	14,3	15,2

Tabla 6.40: Estabilidad, Deformación y % de Huecos en la AC 22 S

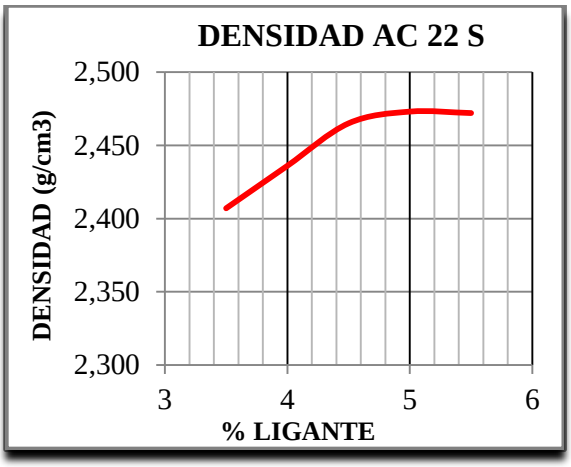


Figura 6.9: Gráfico Densidad AC 22 S

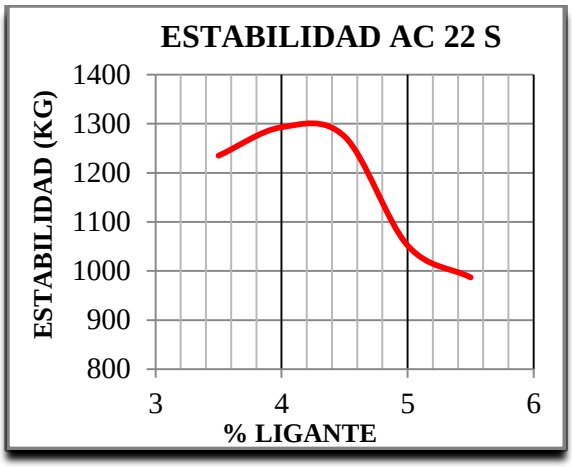


Figura 6.10: Gráfico Estabilidad AC 22 S

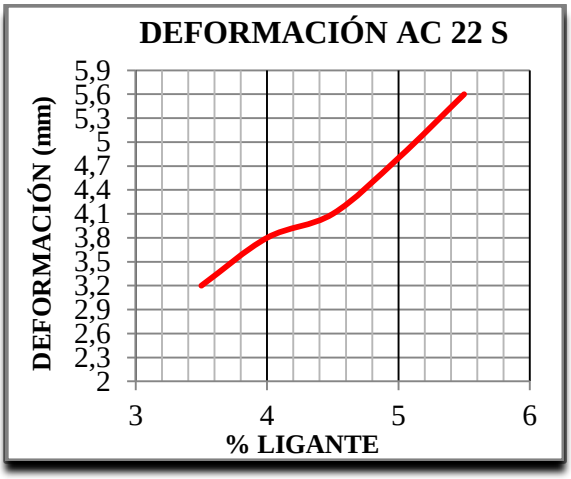


Figura 6.11: Gráfico Deformación AC 22 S

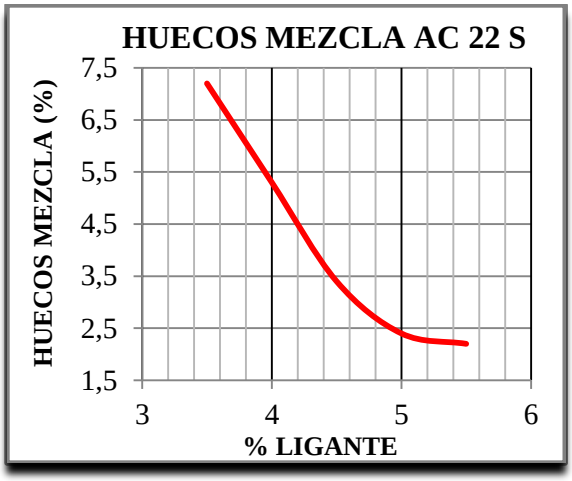


Figura 6.12: Gráfico Huecos Mezcla AC 22 S

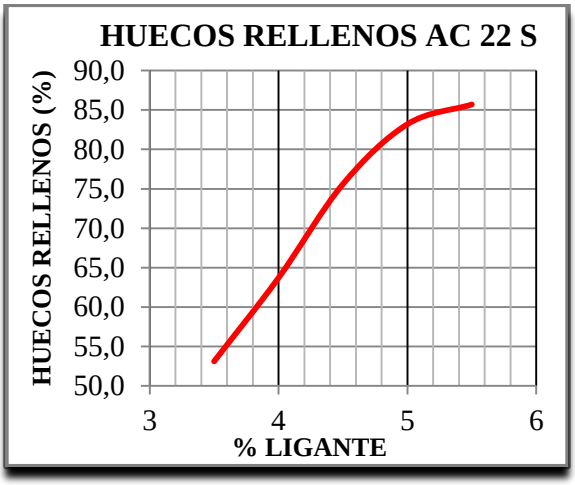


Figura 6.13: Gráfico Huecos Rellenos AC 22 S

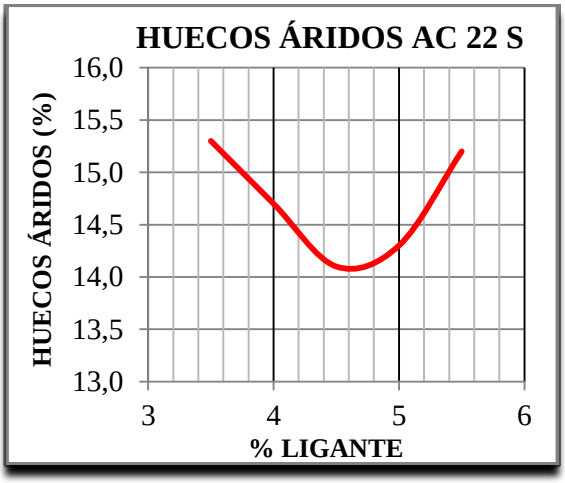


Figura 6.14: Gráfico Huecos Áridos AC 22 S

En la elección del porcentaje de ligante adecuado para la mezcla, hay que seguir los criterios de dosificación expuestos en la tabla 542.12 del PG-3 que es la que se muestra a continuación:

Característica		Categoría de tráfico pesado			
		T00 y T0	**T1 y T2**	**T3 y arcenes**	**T4**
Estabilidad (kN)		> 51	> 12,5	> 10	8-12
Deformación (mm)		2-3	2-3,5		2,5-3,5
Huecos en mezcla (%)	Capa de rodadura	4-6	4-6	3-5	
	Capa intermedia	4-6	5-8*	4-8	4-8**
	Capa base	5-8*	6-9*	5-9	
Huecos en áridos (%)	Mezclas -12	≥ 15			
	Mezclas -20 y -25	≥ 14			

*** En las mezclas bituminosas de alto módulo: 4-6.**

**** En vías de servicio.**

Tabla 6.41: Criterios de dosificación empleando el aparato Marshall

Además, habrá que cumplir un mínimo de dotación de ligante, cuyos valores se exponen en la tabla 542.10 del PG-3 y que se muestra a continuación:

Tipo de capa	Tipo de mezcla	Dotación mínima (%)
Rodadura	Drenante	4,5
	Densa y semidensa	4,75
Intermedia	Densa, semidensa y gruesa	4,0
	Alto módulo	5,2
Base	Semidensa y gruesa	3,5
	Alto módulo	5,2

Tabla 6.42: Dotación mínima de ligante (% en masa sobre el total del árido seco, incluido el polvo mineral)

La capa compuesta por la mezcla bituminosa SMA 11 tendrá un espesor de 5 cm, tal y como se especificó en el apartado anterior [2.3. Justificación]. Además, se corresponde con una mezcla densa. Con todas estas características de la capa más las especificaciones de parámetros impuestas por [15] y que se han mostrado en las tablas anteriores, la composición más adecuada para la mezcla SMA 11 y las características que finalmente adquirirá serán las siguientes (la inclusión de la Gravilla Corneana de la cantera Cuadrado será explicada con detalle posteriormente en [7. Conclusiones y futuras líneas de investigación]):

- Gravilla Corneana: Árido de machaqueo tipo corneana procedente de la cantera Cuadrado (Ávila)…….50%
- J. Abarca: Árido de machaqueo tipo caliza procedente de Áridos Abarca (Escombrera privada) (Almería)……42,2%
- Filler calizo procedente de Macael (Almería)……..7,5%
- Fibras Celulosa…….0,3%
- Betún 30/50……6,5% sobre mezcla
- Los tamaños inferiores a 4 mm incluido el filler procedentes del machaqueo de Abarca……21,2%
- Los tamaños superiores a 8 mm procedentes de la cantera de Cuadrado……32%
- Los tamaños comprendidos entre 4 mm y 8 mm:
    - Procedentes del machaqueo de Abarca…….22%
    - Procedentes de Cuadrado……..18%
- Resultados del ensayo de escurrimiento (según [15] es adecuado que no supere el 0,3%)……..……..0,1%
- Estabilidad (Kg)……1558,7
- Deformación (mm)……....4,09
- Huecos mezcla (%)……2,54

- Huecos rellenos (%)……85,34
- Huecos áridos (%)……...17,48

El grueso compuesto por la mezcla bituminosa AC 22 S (antigua S 20) tendrá un espesor de 15 cm, según se especificó anteriormente en el apartado [2.3. Justificación]. Además, se corresponde con una mezcla densa. Con todas estas características de la capa más las especificaciones de parámetros impuestas por el PG-3 y que se han mostrado en las tablas anteriores, la composición más adecuada para la mezcla AC 22 S y las características que finalmente adquirirá serán las siguientes (la inclusión de la Gravilla Corneana de la cantera Cuadrado será explicada con detalle posteriormente en [7. Conclusiones y futuras líneas de investigación]):

- Gravilla Corneana: Árido de machaqueo tipo corneana procedente de la cantera Cuadrado (Ávila)……...50%
- J. Abarca: Árido de machaqueo tipo caliza procedente de Áridos Abarca (Escombrera privada) (Almería)……...45%
- Filler calizo procedente de Macael (Almería)…….5%
- Betún 50/70……....4,3% sobre mezcla
- Los tamaños inferiores a 4 mm procedentes del machaqueo de Abarca……..…35%
- Los tamaños superiores a 8 mm procedentes de la cantera de Cuadrado…….38%
- Los tamaños comprendidos entre 4 mm y 8 mm:
    - Procedentes del machaqueo de Abarca…….10%
    - Procedentes de Cuadrado……..12%
- Estabilidad (Kg)……1388,3
- Deformación (mm)……3,95
- Huecos mezcla (%)……4,08
- Huecos rellenos (%)……71,15

- Huecos áridos (%)……...14,27

6.17. Resultados del estudio del comportamiento a fatiga de mezclas asfálticas mediante el ensayo BTD

Las probetas se ensayaron a una temperatura determinada situándolas en la vertical de la línea de acción de carga. Al inicio del ensayo se introdujeron tensiones residuales debidas al agarre de las mordazas que, aun siendo insignificantes en el orden de 0,23 KN, se tendrán en cuenta en las labores de análisis matemático.

Las gráficas resultantes del ensayo de las probetas a velocidad constante de 1 mm/min son las representadas a continuación, en ellas la abscisa corresponde al desplazamiento en milímetros y las ordenadas a la carga en KN.

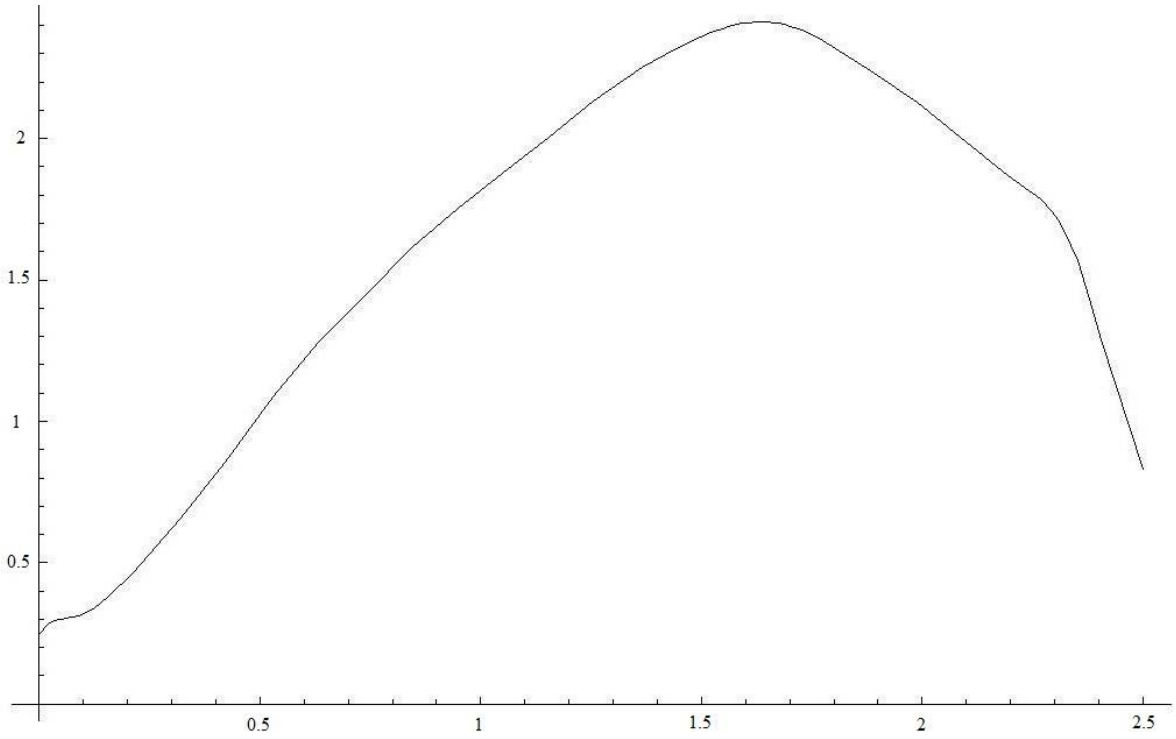


Figura 6.15: Curva Carga (KN) – Desplazamiento (mm). Probeta "A" SMA 11

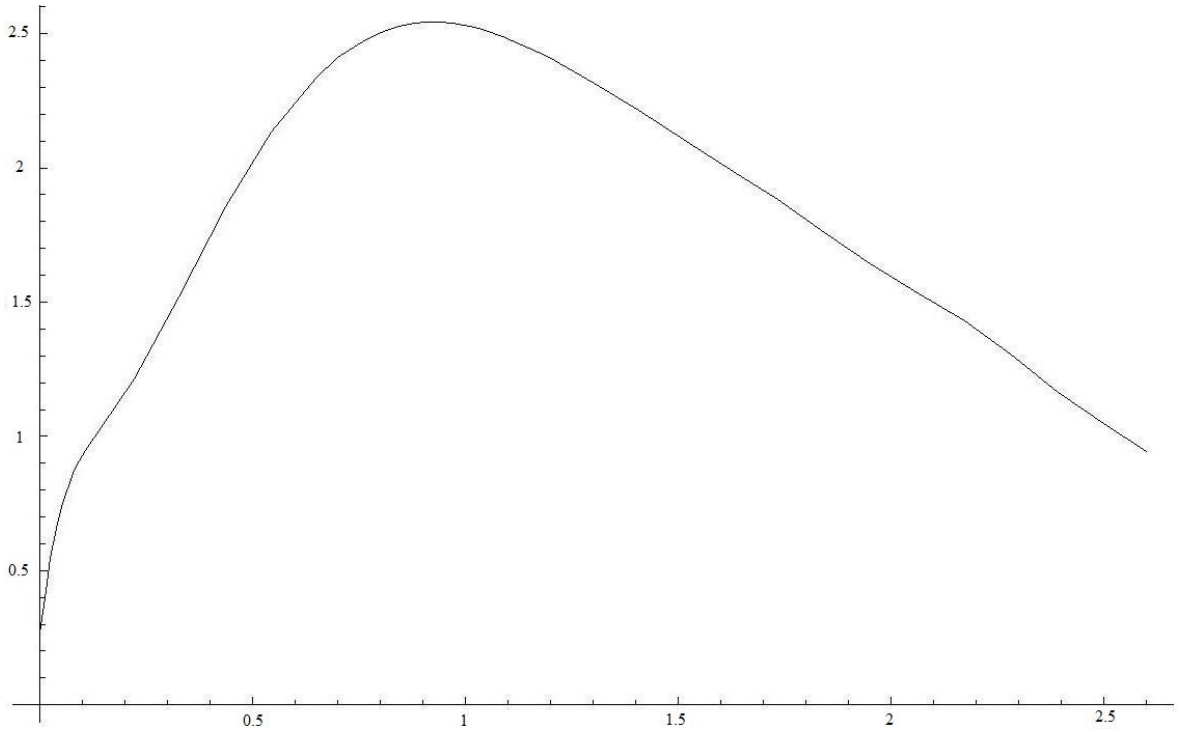


Figura 6.16: Curva Carga (KN) – Desplazamiento (mm). Probeta "B" SMA 11

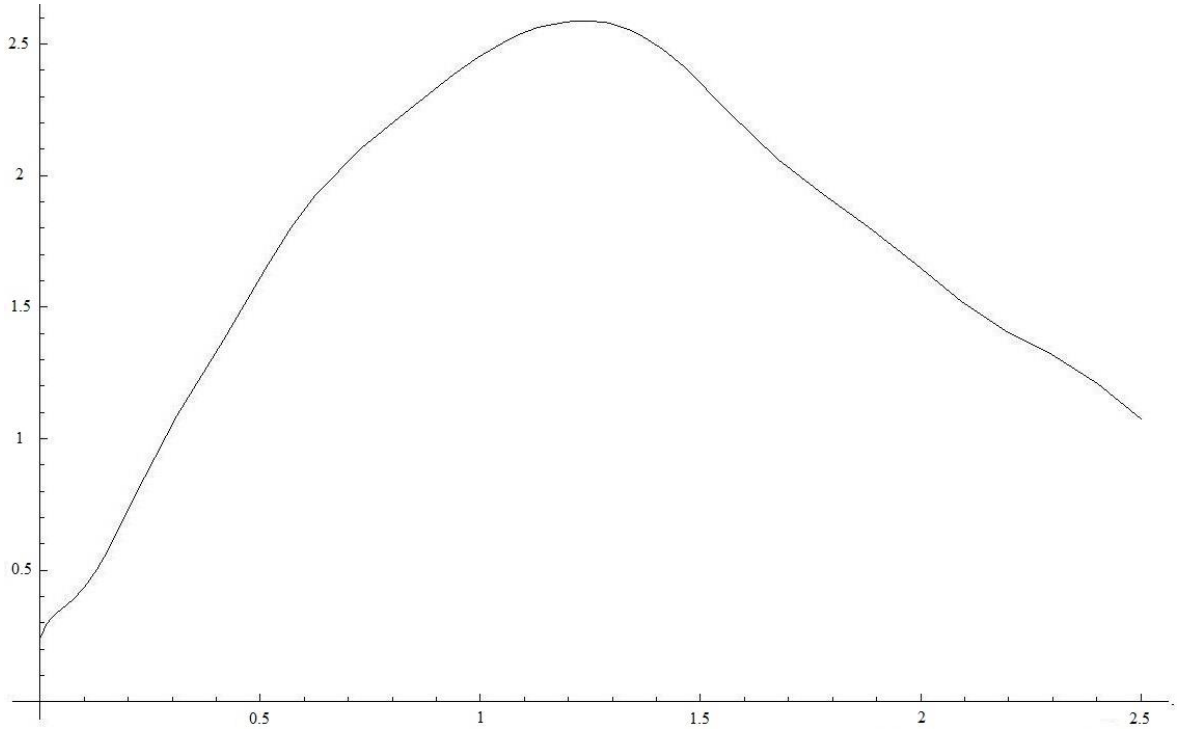


Figura 6.17: Curva Carga (KN) – Desplazamiento (mm). Probeta "1" AC 22 S

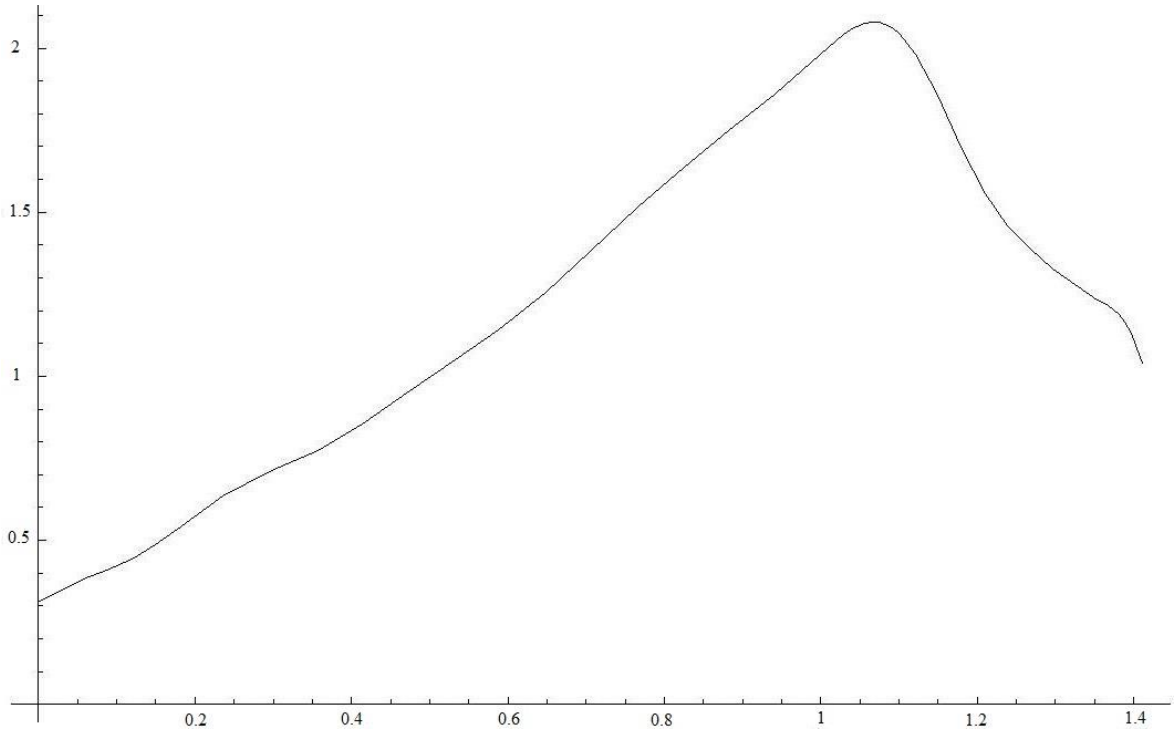


Figura 6.18: Curva Carga (KN) – Desplazamiento (mm). Probeta "2" AC 22 S

Con las gráficas anteriores obtenidas tras la realización del ensayo, se pueden calcular aquellos parámetros necesarios para sacar conclusiones del ensayo. Estos parámetros son la deformación a rotura, energía específica de fractura y resistencia máxima a tracción. En las tablas que se muestra a continuación, quedan calculados los resultados del ensayo:

MEZCLA	SMA11	SMA11
PROBETA	A	B
ÁREA SOLICITADA PROBETA (mm^2)	3424,37	4015,2
CARGA MÁXIMA (KN)	2,412	2,543
DEFORMACIÓN A ROTURA (dR) (mm)	2,418	2,307
ENERGÍA ESPECÍFICA DE FRACTURA (Gf) (Nmm/mm^2)	1,163	1,096
RESISTENCIA MÁXIMA A TRACCIÓN ($\sigma_{máx}$) (N/mm^2)	0,70424	0,633351
DENSIDAD (Mg/m^3)	2,307	2,254

Tabla 6.43: Parámetros del ensayo BTD para probetas SMA 11

MEZCLA	AC22S	AC22S
PROBETA	1	2
ÁREA SOLICITADA PROBETA (mm^2)	3333.76	2663.83
CARGA MÁXIMA (KN)	2,587	2,080
DEFORMACIÓN A ROTURA (dR) (mm)	2,327	1,411
ENERGÍA ESPECÍFICA DE FRACTURA (Gf) (Nmm/mm^2)	1,267	0,648
RESISTENCIA MÁXIMA A TRACCIÓN ($\sigma_{máx}$) (N/mm^2)	0,723382	0,780775
DENSIDAD (Mg/m^3)	2,415	2,421

Tabla 6.44: Parámetros del ensayo BTD para probetas AC 22 S

Con la gráfica de correlación entre los valores de deformación a rotura (dR) y deformación crítica (dC) (Figura 5.12), se obtienen los valores de deformación crítica para las distintas probetas y mezclas:

MEZCLA	SMA11	SMA11
PROBETA	A	B
DEFORMACION CRITICA (dC) (mm)	0,141	0,140

Tabla 6.45: Deformación Crítica (dC) de las Probetas SMA 11

MEZCLA	AC22S	AC22S
PROBETA	1	2
DEFORMACION CRITICA (dC) (mm)	0,140	0,129

Tabla 6.46: Deformación Crítica (dC) de las Probetas AC 22 S

En el caso de estudio, tomando como referencia el AVE Madrid-Valencia, se supone que para una vida útil de 50 años le corresponderá 6,4 millones de ciclos, por lo que la deformación unitaria admisible será de 0,000025 con una deformación crítica de 0,140 representativa de las mezclas ensayadas.

Por otra parte, en comparación con los estudios dinámicos y estáticos de mezclas de similares características y teniendo en cuenta la deformación de rotura así como la energía específica de fractura se pueden estimar los valores siguientes de módulo dinámico.

MEZCLA	SMA11	SMA11
PROBETA	A	B
MÓDULO DINÁMICO N/mm2	8433	8024

Tabla 6.47: Módulo Dinámico SMA 11

MEZCLA	AC22S	AC22S
PROBETA	1	2
MÓDULO DINÁMICO N/mm2	8098	3945

Tabla 6.48: Módulo Dinámico AC 22 S

A la vista de los resultados se puede concluir que el material tiene un comportamiento dúctil adecuado para el fin que se va a utilizar, distinguiéndose una zona elástica inicial y una posterior plástica bien diferenciada.

Los valores de energía específica, deformación a rotura y tensión máxima de tracción se encuentran dentro de la normalidad en comparación con mezclas densas y semidensas por lo que señala una formulación correcta.

Los valores inferiores al conjunto de la probeta 2, mezcla AC 22 S, pueden estar ocasionados por variación de la temperatura de ensayo, ya que a diferentes temperaturas el betún se comporta de forma diferente pudiendo ser elástico, viscoso o plástico.

Por otra parte, los valores ligeramente altos del módulo dinámico respecto de lo dispuesto en la Instrucción para el Diseño de Firmes de Carreteras de Andalucía, de 6000 Mpa se encuentra dentro de la normalidad. Debe tenerse en cuenta que el ensayo se realiza en unas condiciones totalmente diferentes a las de obra, donde la densidad alcanzada siempre será menor que la conseguida en laboratorio, hecho que influirá notablemente. Además, el ensayo se realiza a 5ºC no siendo habitual esta temperatura constantemente en los tramos ejecutados.

Por estos motivos se recomienda que para posteriores labores de modelización se utilicen los valores que detalla la normativa vigente de las mezclas en cuestión y nunca los resultados de los ensayos, ya que, como se ha mencionado anteriormente las condiciones en obras y el confinamiento producido por los propios materiales no será igual.

Según [32], se realizará el cálculo diferenciando el módulo de las distintas capas, considerando los valores dados en la siguiente tabla:

TIPO DE MEZCLA	E (MPa)	ν
Densas y semidensas	6.000	0,33
Gruesas	5.000	0,33
Drenantes y abiertas	4.000	0,35
Discontinua en capa fina	4.000	0,35
De alto módulo	12.000	0,30
Abiertas en frío	1.500	0,35
Grava-emulsión tráficos T3 y superiores	4.000	0,35
Grava-emulsión tráficos T4	2.500	0,35

Tabla 6.49: Características mecánicas de mezclas bituminosas

Finalmente, para las leyes de fatiga se emplearán las recomendaciones detalladas en [32] en el apartado 5.4.2.2. b, leyes de fatiga para capas bituminosas.

7. Conclusiones y futuras líneas de investigación

El trabajo de investigación que se ha realizado ha contribuido de manera muy importante en la creación de un nuevo sistema de vía en placa para el transporte ferroviario mediante el desarrollo de un paquete de firmes adecuado. Por lo tanto, se muestra una valiosa aportación dentro de un modelo constructivo poco conocido en España.

Dentro de los puntos de este trabajo, los que se pueden considerar como los de mayor relevancia son aquellos que analizan las características de los materiales que posteriormente formarán el firme. Ya que como es bien sabido, la base de una buena construcción consiste en el conocimiento de las propiedades de cada una de las partes que la componen, entre las que se encuentran los materiales que la forman.

Como se menciona a lo largo de este documento, dos han sido los mayores problemas que han surgido. Por un lado, la inexistencia de normativa que regule la aplicación de capas de firme en las vías ferroviarias, ha obligado a utilizar la normativa de carreteras, la cual tan sólo se ha podido emplear como referencia al no haber igualdad entre una vía férrea y una carretera. Por otro lado, los materiales destinados a la fabricación del firme han resultado ser en su mayoría residuos, entre los que se encuentran los desechos de escombrera [5.2.1. Áridos] y los lodos de corte [5.2.2. Filler]. De manera que, no ha habido referencias sobre el comportamiento de dichos residuos en su uso como material de construcción, por lo que se han tenido que ensayar desde cero para obtener todas sus propiedades. La justificación del empeño por el reciclaje de material se basa en aspectos técnicos, económicos, medio ambientales y estratégicos [3. Objetivos].

Tras la realización de los diversos ensayos, se han ido descubriendo aquellos materiales que cumplían para el fin al que serían destinados, al igual que se han ido apartando aquellos que por unas circunstancias u otras no satisfacían algún requerimiento.

Comenzando con el análisis de los áridos, se han descubierto numerosas propiedades de éstos que han contribuido a la elección de la mejor opción para la fabricación del firme:

- Un primer ensayo que ha determinado una propiedad fundamental de las muestras ha sido el Equivalente de Arena, donde se ha demostrado que todos los áridos

tienen una baja proporción de finos (arcillas), que son las partículas más susceptibles de reaccionar con el agua.

- Por otro lado, los resultados de la Calcimetría de Bernard [6.2] han manifestado que todas las muestras suministradas tienen un alto porcentaje de carbonato cálcico en su composición por lo que se corresponden a áridos calizos. Esto determina un buen comportamiento de adhesividad por parte de los áridos [6.2.].

- En cuanto al Ensayo de los Ángeles, ha servido para descartar gran parte de las muestras al no cumplir con las exigencias. De hecho, tan sólo los J. Abarca (LA cercano a 25) y los Aleros Oscuros (LA cercano a 35) han mostrado ser los únicos que podrían servir para la fabricación de las mezclas bituminosas [6.3], por lo que los demás se ha dejado de investigarlos. Aun así, son valores elevados, por lo que se ha optado por la inclusión de un árido de mayor calidad procedente de cantera y que será explicado más adelante.

- Otro ensayo de gran importancia ha sido el del Coeficiente de forma [6.5], el cual ha arrojado resultados satisfactorios de las dos muestras ensayadas (J. Abarca y Aleros Oscuros). Con ello se indica que los áridos disponen de una pequeña proporción de partículas angulosas que son perjudiciales dentro de las capas asfálticas ya que al resistir los esfuerzos se pueden dividir en partículas más pequeñas, modificando con ello la granulometría de la mezcla.

- Para determinar la susceptibilidad de los áridos a la acción de cambios severos de temperatura se realizó el ensayo de resistencia a ciclos de hielo y deshielo [6.6.]. De los resultados obtenidos se deduce que ambas muestras no se ven considerablemente modificadas bajo la acción de cambios de temperatura.

- Hasta ahora, de todas las muestras de áridos suministradas, tan sólo dos han conseguido cumplir con las exigencias. Pero es en el análisis del coeficiente de absorción y contenido de agua donde se descartan los Aleros Oscuros debido a que presentan una alta capacidad de alojar agua en su interior, lo cual es perjudicial en las mezclas asfálticas ya que la intrusión de agua puede provocar la reacción con otros componentes como el betún y provocar la fluencia de capa. Por parte de los J. Abarca, cumplen al no tener una elevada capacidad de absorción de agua tanto en el árido grueso [6.7] como en el fino [6.8].

- Por tanto sólo queda un árido (J. Abarca), con el que se demuestra que el contenido de impurezas de las partículas gruesas es bajo [6.9] por lo que cumple con los requisitos.

Para concluir con el análisis de los áridos, se ha llegado a la determinación de que el más adecuado se corresponde con el J. Abarca. Sin embargo, los resultados arrojados por el Ensayo de los Ángeles, muestran que el árido procedente de desechos de escombrera no tiene una excelente resistencia a la fragmentación. Esto era una característica que se podía intuir al tratarse de áridos calizos, ya que éstos no suelen tener unas elevadas propiedades de resistencia. De esta forma, se decidió incluir en la mezcla bituminosa un 50% de áridos procedentes de cantera, dentro de la fracción gruesa, la cual es la encargada de soportar gran parte de la resistencia, mientras que para la fracción fina se sigue con el J. Abarca que dispone de una elevada adhesividad al tener una gran composición de caliza. Estos nuevos materiales adicionados se corresponden a rocas ofíticas que comercialmente se denominan pórfidos y su uso está muy extendido en el asfaltado de carreteras, así como en la construcción de vías de ferrocarril. Sus resultados en el Ensayo de los Ángeles están cercanos a LA ≈ 15, lo que indica que tienen una gran resistencia a la fragmentación, por lo que uniendo éstos a los J. Abarca se consigue mejorar esta característica.

Una vez elegido el árido más adecuado para la mezcla bituminosa, se pasa a determinar cuál es el filler más conveniente. Con el análisis se conseguirá además descubrir las características de dicho material:

- El primer ensayo que ha empezado a diferenciar a los dos fillers ha sido el del Índice de Plasticidad [6.11]. El Filler A dispone de un IP ligeramente mayor a 4, mientras que es recomendable que sea inferior a 4. Esto es debido a que una característica fundamental que se le exige al filler es que sea lo más permeable posible, es decir, con un IP pequeño, lo que significa que no va a asociarse con el agua para formar una masa con un comportamiento plástico que provoque que el filler deje de cumplir su función dentro de la mezcla bituminosa.

- Según la densidad aparente del filler en Tolueno [6.12], las dos muestras tienen unas densidades entre 0,5 y 0,8 g/cm^3, por lo que tendrán una actividad de adhesividad media que es la adecuada en mezclas asfálticas.

- Al igual que ocurrió con el árido, se le ha realizado a los fillers la Calcimetría de Bernard y se han obtenido unos resultados que muestran un elevado contenido de carbonato cálcico [6.13], por lo que se pueden considerar ambos fillers como calizos. En concreto el Filler B es más calizo que el Filler A, que se puede apreciar visualmente al observar que el "B" es más blanquecino que el "A". Por consiguiente las dos muestras son adecuadas para las mezclas bituminosas ya que al ser calizos tienen unas buenas propiedades de adhesividad.

- A la hora de trabajar con las dos muestras de filler, se han tenido dificultades en el tamizado del "B" debido a su elevado contenido de agua que ha sido demostrado por los resultados del ensayo correspondiente [6.14]. Este pequeño problema se ha ido solucionando con un previo desmenuzado de las partículas que habían quedado apelmazadas.

Una vez finalizados todos los ensayos realizados a los dos fillers, se ha llegado a la conclusión de que ambos son adecuados para su empleo en la fabricación de mezclas bituminosas. Sin embargo, se ha optado por escoger el Filler B, el cual presenta un mayor componente de caliza y por tanto, será el que tenga una mayor adhesividad.

En este punto ya se dispone del árido y del filler elegidos para la fabricación de la mezcla asfáltica. Para completarla es necesaria la elección de un betún adecuado para cada una. Por un lado, se ha elegido el B 30/50 para la mezcla SMA 11 y por otro lado, se ha escogido el B 50/70 para la AC 22 S. Éstos pertenecen al grupo de los betunes duros, según [36], que tienen la propiedad de ser más consistentes, es decir, rígidos y viscosos a altas temperaturas, por lo que son aptos para su uso en zonas cálidas como las de Andalucía.

Ya se han seleccionado los materiales que formarán las mezclas bituminosas elegidas (SMA 11 y AC 22 S), que ya fueron explicadas anteriormente [2.3. Justificación]. Con ellas se va a permitir crear el paquete de firmes buscado a lo largo de la investigación. Dicho firme soportará las exigencias de resistencia a las que va a verse sometido, además de dotar de elasticidad al conjunto de vía en placa. De esta forma se van a disminuir ciertos problemas surgidos en algunos modelos de vía sobre placa ya realizados con anterioridad, que estaban relacionados con la elevada rigidez de la placa de hormigón, en la cual, ante el mínimo asiento diferencial, comenzaban a aparecer fisuras ocasionando con ello la disminución de sus características de resistencia.

El paquete de firmes creado, el cual ha sido explicado con detalle [2.3. Justificación], tiene un grosor de 20 cm. Los 5 cm superiores corresponden a una capa formada por la mezcla SMA 11 mientras que los 15 cm inferiores corresponden a dos capas de 7,5 cm cada una formadas ambas por la mezcla AC 22 S. Aunque bien es sabido que el PG-3 aconseja disponer el menor número de capas posible dentro de un mismo paquete para procurar que todo actúe como un conjunto, en este caso se ha preferido dividir los 15 cm de AC 22 S en dos capas para conseguir una correcta compactación del firme.

Como se tienen tres capas de mezcla bituminosa, para que éstas actúen como un conjunto homogéneo y resistente, se aplicará entre cada una de ellas un riego de adherencia explicado en el apartado [5.2.6. Riegos bituminosos] de este trabajo. También se aconseja un pretratamiento de la cara superficial del terreno natural, antes de comenzar con la construcción del paquete de firmes sobre éste. Dicho tratamiento puede ser el de un riego de imprimación, también explicado brevemente en el apartado [5.2.6. Riegos bituminosos]. Aun así, los riegos bituminosos no son objeto de estudio de este trabajo de investigación, por lo que no se ha entrado en mayor detalle.

En lo referente al futuro de la investigación de este sistema puede ir encaminado al análisis de mezclas bituminosas con composiciones en las que se reduzca el porcentaje de árido procedente de cantera, consiguiendo de esta manera fabricar mezclas más económicas y respetuosas con el Medio Ambiente. Con la construcción del tramo de prueba, se podrá medir el comportamiento de las mezclas ensayadas y de este modo contemplar la posibilidad de disminuir la cantidad necesaria de árido de cantera, en el caso en el que la mezcla cumpla adecuadamente.

Otra línea de investigación, dentro de la vía en placa, puede ser la de desarrollar una variante al sistema investigado, con objeto de conseguir mejorar las propiedades del conjunto. Dichas variantes pueden ser muy diversas, desde la modificación de la sujeción del carril, hasta la elección de otro tipo de placa de hormigón y de firme. Pero todo esto ya se escapa a la investigación llevada a cabo en este Trabajo de Fin de Grado.

8. Referencias bibliográficas

[1] JOSÉ ANTONIO PAÑERO HUERGA. *Vía en placa: Aplicación a entornos metropolitanos.* Disponible en:

http://www.ciccp.es/biblio_digital/Urbanismo_I/congreso/pdf/030206.pdf

[2] RAFAEL ARTURO DUEÑAS NARANJO. *Elementos de ayuda para la toma de decisiones sobre la utilización de vías sin balasto.* Disponible en:

http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/4948/1/00.pdf

[3] NÚRIA ADMETLLA PÉREZ. *Transición vía en placa – vía con balasto mediante traviesas cuadro.* Universitat Politècnica de Catalunya. 722-TES-CA-4902. Disponible en:

http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/12580/1/TESINA.pdf

[4] I. A. CARRASCAL, J. A. CASADO, J. A. POLANCO, F. GUTIÉRREZ-SOLANA. Comportamiento dinámico de placas de asiento de sujeción de vía de ferrocarril. *Anales de mecánica de la fractura*, 2005, 22, 372-377. Disponible en:

http://www.gef.es/Congresos/22/pdf/61.pdf

[5] JOAN MANUEL ESTRADÉ PANADÉS. La superestructura de vía en placa en las nuevas líneas de alta velocidad de nuestro país. *Revista de obras públicas,* 1998, 3372, 63-74. Disponible en:

http://ropdigital.ciccp.es/pdf/publico/1998/1998_enero_3372_03.pdf

[6] JOSÉ JULIÁN MENDOZA FERNÁNDEZ. *Perspectivas de desarrollo de la vía sin balasto en España.* Madrid: Ferroviaria, 1998, 49-58. Disponible en: http://ruc.udc.es/dspace/bitstream/2183/10685/1/CC%2041%20art%207.pdf

[7] RAIL.ONE. Disponible en:

http://www.railone.es/es/main-nav/productos/transporte-regional-y-de-largo-recorrido/via-en-placa.html

[8] ÁLVAREZ-CASCOS FERNÁNDEZ. Anejo: Norma 6.1 IC: Secciones de firmes. *Boletín Oficial del Estado (BOE),* Madrid, 2010, 2ª Reimpresión, 21-23. Disponible en:

http://www.carreteros.org/normativa/firmes/derogadas/secciones/oc10_02/indice.htm

[9] http://www.caes.eu/wikicaes/balasto.pdf

[10] BAÑÓN BLÁZQUEZ, LUIS. *Capas bituminosas.* Disponible en: http://sirio.ua.es/proyectos/manual_%20carreteras/02020502.pdf

[11] SISTEMA GETRAC. Disponible en:

http://www.railone.es/es/main-nav/productos/transporte-regional-y-de-largo-recorrido/via-en-placa/getrac.html

[12] RAIL.ONE. *Getrac ballastless track system.* Disponible en:

http://www.railone.es/fileadmin/dateien/03_Broschueren/EN/Getrac_EN2012_ebook.pdf

[13] SISTEMA ATD. Disponible en:

http://www.railone.es/es/main-nav/productos/cercanias/via-en-placa/tranviaferrocarril-suburbano/atd-g.html

[14] RAIL.ONE. *ATD-G, the Green tracks for urban traffic.* Disponible en:

http://www.railone.es/fileadmin/dateien/03_Broschueren/EN/Green_tracks_EN_2011_ebook.pdf

[15] BALTASAR RUBIO, LEONARDO ENRÍQUEZ, et al. *Diseño de mezclas SMA, como capa de rodadura e intermedia, para su empleo en España.* Comunicación 33. Disponible en:

http://www.proyectosma.eu/modules/mastop_publish/files/files_5087beb14dcf8.pdf

[16] SANTIAGO LANCHAS, RUY NÚÑEZ, et al. *Fibras de celulosa aditivadas para mezclas tipo SMA con propiedades mejoradas.* Comunicación 14. Disponible en:

http://www.proyectosma.eu/modules/mastop_publish/files/files_5232d2905a737.pdf

[17] JOAQUIN VICENTE CAMPO. *Filler, antienvejecimiento de mezclas bituminosas.* Canteraselcerro.com, 2013. Disponible en: http://www.canteraselcerro.com/filler-antienvejecimiento-de-mezclas-bituminosas/

[18] AJUNTAMENT DE SANT FELIU DE LLOBREGAT. *Anejo nº 6: Superestructura y secciones tipo.* Barcelona. Octubre, 2008. Disponible en:

http://www.santfeliu.cat/directori/ProjecteSoterrament/Estudio%20Informativo%20Integracion%20del%20Ferrocarril%20en%20Sant%20Feliu%20de%20Llobregat/01%20Memoria%20y%20Anejos/Anejos/06%20Superestructura%20y%20secciones%20tipo.pdf

[19] SORIGUÉ. *Curva granulométrica y huso para la mezcla AC 22 BIN 50/70 (S-20).* Disponible en:

http://www.sorigue.com/fileadmin/user_upload/sorigue/Mezclas_asfalticas/AC_22_BIN_50_70_S-20.pdf

[20] CEPSA. *Mezclas bituminosas en caliente. Capítulo 5.* 57-76. Disponible en: https://www.cepsa.com/stfls/CepsaCom/Contenidos_comunes/Documentos/capitulo_5_1.pdf

[21] AENOR. *Áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales de carreteras.* Madrid: AENOR N.A. 71.970, marzo de 2001.

[22] PG-3. Artículo 543. Mezclas bituminosas para capas de rodadura. Mezclas drenantes y discontinuas. *Parte 5ª Firmes.* OC 24/2008, 543, 74-114. Disponible en: http://www.fomento.es/NR/rdonlyres/7E090150-7354-4F83-8D4E-E4BA2BE70717/109255/1610500.pdf

[23] EDUARDO BENAVENTE CANNON. *Equivalente de Arena. Concepto y aplicación.* Lima-Perú. Disponible en:

http://xa.yimg.com/kq/groups/13240622/714218388/name/EQUIVALENTE+DE+ARENA-CONCEPTO+Y+APLICACION.docx

[24] CONSEJERÍA DE MEDIO AMBIENTE DE LA JUNTA DE ANDALUCÍA. *Los criterios y estándares para declarar un suelo contaminado en Andalucía y la metodología y técnicas de toma de muestra y análisis para su investigación. Parte 4: Metodología para declarar un suelo contaminado.* Universidad de Granada: Enero 1999. Disponible en:

http://www.ugr.es/~fjmartin/Criterios%20y%20estandares.pdf

[25] PADILLA RODRÍGUEZ, ALEJANDRO. *Capítulo 2: Materiales Básicos.* Universitat Politècnica de Catalunya. Disponible en:

http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3334/13/34065-13.pdf

[26] WIKIVIA. *Caracterización del árido grueso.* Disponible en:

http://www.wikivia.org/wikivia/index.php/Caracterizaci%C3%B3n_del_%C3%A1rido_grueso

[27] CÉSAR GARCÍA, ANDREU, et. al. *Determinación de la granulometría de un árido.* Alicante: Universitat d´Alacant, 2009. Disponible en:

http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/10998/3/Pr%C3%A1ctica%20N%C2%BA%203%20_Granulometria%20I_.pdf

[28] ALANIS VELAZQUEZ, JOSÉ ISMAEL. *Construcción de terracerías y caminos asfálticos. S. M. A. (Stone Mastic Asphalt).* Disponible en:

https://www.facebook.com/ConstruccionDeTerraceriasYCaminosAsfalticos/posts/142271479267527

[29] MORENO PÉREZ, MIGUEL ÁNGEL. *Influencia de la naturaleza del filler de aportación en la adhesividad árido-ligante para mezclas bituminosas discontinuas.* Zaragoza: Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza, 2011. Disponible en: http://zaguan.unizar.es/TAZ/EUITIZ/2011/6222/TAZ-PFC-2011-397.pdf

[30] BUSTOS PRETEL, GERARDO. *Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes. PG-3.* Madrid: Liteam, 2001. Disponible en: http://www.aznartopografia.com/assets/files/Servicios/Ingenieria-civil/PG3.pdf

3ª Edición disponible en: http://personales.upv.es/fbardisa/Pdf/Pg3-1.pdf

[31] PÉREZ JIMÉNEZ, FÉLIX EDMUNDO, et al. *Estudio del comportamiento a fatiga de mezclas asfálticas mediante ensayo BTD.* Disponible en:

http://www2.udec.cl/~provial/trabajos_pdf/31GrabielPalmaFatigaMezclasasfalticas.pdf

[32] BAS DUTOR, ALBERTO, et. al. *Instrucción para el diseño de firmes de la red de carreteras de Andalucía.* Sevilla: Consejería de Obras Públicas y Transportes, 2007. Disponible en:

http://www.carreteros.org/normativa/firmes/pdfs/ccaa_pdf/andalucia/instruccion.pdf

Versión 2003, Disponible en:

http://infodigital.opandalucia.es/bvial/bitstream/10326/175/1/icafir.pdf

[33] LÓPEZ M. JUAN MANUEL. *Geología Aplicada a la Ingeniería Civil.* Madrid: Dossat 2000, 2006.

[34] GALLEGO SEVILLA, RAFAEL, MARTÍNEZ CASTRO, ALEJANDRO E. *Nuevo Sistema de Vía en Placa para ferrocarril de alta velocidad mediante capas de SMA (Stone Mastic Asphalt). Análisis tensodeformacional preliminar mediante modelos de elementos finitos.* Granada: Dpto. Mecánica de Estructuras e Ingeniería Hidráulica (Universidad de Granada), 2014.

[35] SÁNCHEZ, J. A., et. al. *Utilización de lodos de corte y pulido del mármol en la recuperación de escombreras de mármol.* Almería. Disponible en:

http://www.scielo.oces.mctes.pt/pdf/rca/v33n1/v33n1a18

[36] BAÑÓN BLÁZQUEZ, LUIS. *Betunes Asfálticos.* Disponible en:

http://sirio.ua.es/proyectos/manual_%20carreteras/02020301.pdf

[37] ÁLVAREZ-CASCOS FERNÁNDEZ. *Anejo: Norma 6.1. IC: Secciones de firmes.* Madrid: BOE núm. 297, 2003. Disponible en:

http://www.boe.es/boe/dias/2003/12/12/pdfs/A44274-44292.pdf

[38] ADIF. *Conceptos básicos ferroviarios.* Madrid: 2007 – 2008. Disponible en: http://www.adif.es/es_ES/conoceradif/oferta_de_empleo_publico/doc/08_fc_ConceptosFerroviarios.pdf