



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



DISEÑO DE UNA MEZCLA BITUMINOSA DRENANTE CON ALTAS TASAS DE MATERIAL RECICLADO

DESIGN OF A POROUST ASPHALT MIXTURE CONTAINING HIGH RATES OF RECLAIMED MATERIALS

Trabajo realizado por:

Israel Rodríguez Fernández

Dirigido:

Daniel Castro Fresno

Pedro Lastra González

Titulación:

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

Santander, Septiembre de 2015

TRABAJO FINAL DE MASTER

RESUMEN

DISEÑO DE UNA MEZCLA BITUMINOSA DRENANTE CON ALTAS TASAS DE MATERIAL RECICLADO

DESIGN OF A POROUST ASPHALT MIXTURE CONTAINING HIGH RATES OF RECLAIMED MATERIALS

AUTOR: Israel Rodríguez Fernández

DIRECTORES: Daniel Castro Fresno
Pedro Lastra González

CONVOCATORIA: Septiembre de 2015

Palabras clave

DURABROADS, Mezcla bituminosa drenante, Mezclas sostenibles, Escoria negra, Fresado, Diseño mecánico-empírico, 3D-Move Analysis.

Planteamiento del problema y desarrollo de la solución adoptada

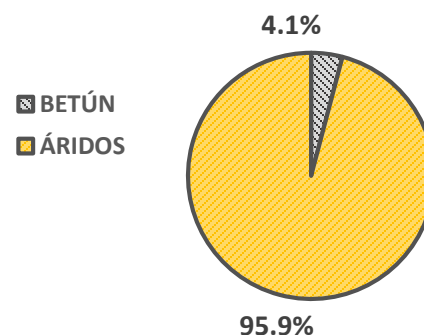
El presente trabajo es una parte de las actividades que configuran el proyecto DURABROADS, este proyecto, financiado por la Comunidad Europea es una de las principales líneas de investigación del Grupo de Investigación de Tecnología de la Construcción (GITECO), trabajando conjuntamente con el Grupo de Caminos de Santander (GCS).

Este trabajo, se sitúa en la línea de la utilización de materiales reciclados en pavimentos, y más concretamente en mezclas bituminosas utilizadas en la capa de rodadura. El tipo de mezcla sobre el cual se desarrolla el proyecto, es una mezcla drenante tipo PA 16 y los materiales reciclados a utilizar son la escoria negra procedentes de la fabricación del acero en horno de arco eléctrico y el material procedente del fresado de carreteras.

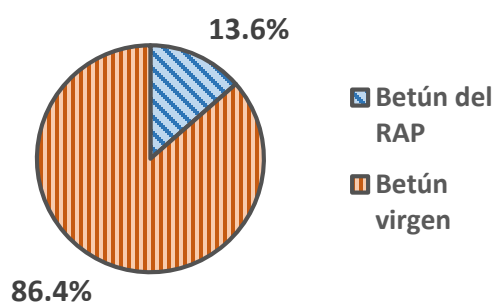
Con todo ello, se plantea un doble objetivo, por un lado, diseñar una mezcla cuyo cuerpo mineral este compuesto en un 100% por materiales reciclados, y por otro lado, que el contenido de material procedente de fresado alcance tasas propias de los hormigones bituminosos utilizados en capas de base (20-30%).

La mezcla resultante de todo el proceso de diseño queda resumida en la siguiente tabla:

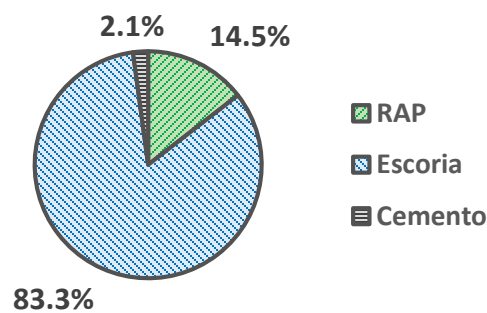
Áridos	95,9 %
Escoria	83,3 %
RAP	14,5 %
Cemento	2,1 %
Betún	4,1 %
Betún del RAP	13,6 %
Betún virgen	86,4 %
Relación filler/betún	0,93 %



Composición del betún:



Composición de los áridos:



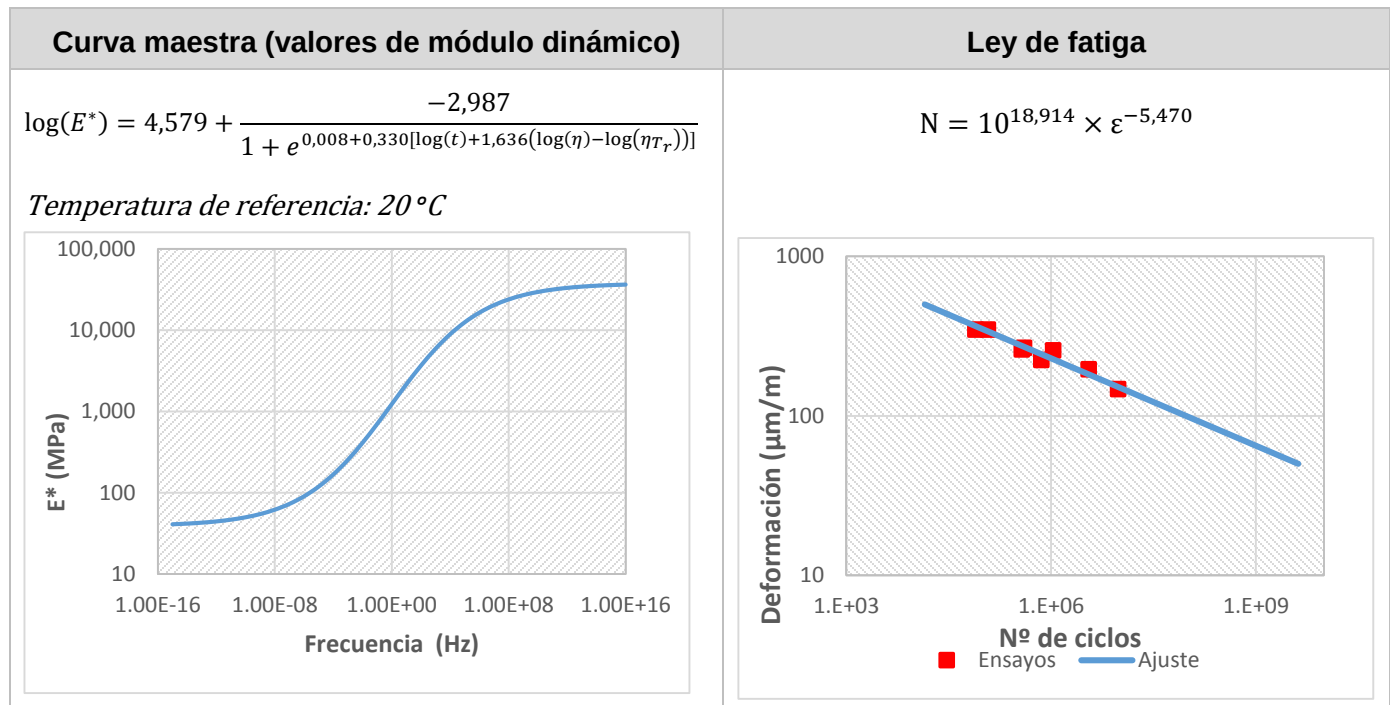
A esta mezcla se le realizaron una serie de ensayos para evaluar su rendimiento, cuyos resultados se presentan a continuación.

Ensayo	Resultado	Normativa
Densidad (gr/cm ³)	2,548	-
Huecos en mezcla (UNE 12697-8) (%)	19,99	≥ 20
Pérdida de partículas (UNE 12697-17) (%)	12,6	< 20 *
Ensayo Cántabro Húmedo (NLT-362) (%)	30,4	< 35 **
Sensibilidad al agua (UNE 12697-12) (% ITRS)	87,7	> 85

* Valores para una categoría de tráfico pesado T00 a T2

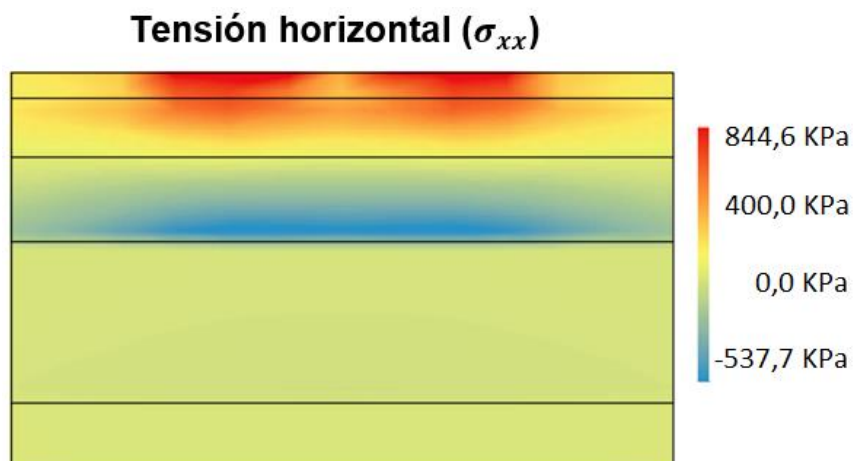
** Valores para una categoría de tráfico pesado T00 a T1

Complementando a estos ensayos, sobre la mezcla se realizaron dos ensayos adicionales con el objetivo de caracterizar su comportamiento mecánico. Estos ensayos tienen la finalidad de, por un lado, obtener el módulo dinámico, y por otro, la ley de fatiga de la mezcla. Ambas características quedan recogidas en los siguientes gráficos:



Por último, se analizó el rendimiento de la mezcla en un paquete de firme de referencia utilizando el programa de análisis 3D. A partir de los resultados obtenidos, aplicando las distintas leyes de comportamiento asociadas a cada material, se determina la vida útil del firme, resultando un valor de 25 años. A continuación se muestran los modos de fallo asociados a cada capa y un ejemplo del resultado obtenido en el análisis 3D.

Capa	Modo de fallo	Ley de comportamiento
PA 16 experimental	Fatiga	$N = 10^{18,914} \times \varepsilon (\mu m/m)^{-5,470}$
AC22 S	Fatiga	$\varepsilon (\mu m/m) = 6.925 \times N^{-0,27243}$
AC32S	Fatiga	$\varepsilon (\mu m/m) = 6.925 \times N^{-0,27243}$
Explanada	Deformación permanente	$\varepsilon_z (\mu m/m) = 2,16 \times 10^4 \times N^{-0,28}$



Conclusiones

La primera conclusión que extraemos de este estudio es que tanto la escoria como el material fresado son dos materiales aptos para su uso en mezclas drenantes. En base a las propiedades analizadas con el software, y a falta de continuar analizando el pavimento, la mezcla experimental ha mostrado un buen rendimiento obteniendo a nivel de laboratorio una vida útil de en torno a 25 años, muy superior a la habitual en este tipo de mezclas.

A nivel de mezcla, se ha demostrado la viabilidad técnica de una mezcla drenante cuyo cuerpo mineral este compuesto en prácticamente un 100% de material reciclado. Este hecho es un aspecto fundamental ya que se consigue cumplir con el principal objetivo planteado al inicio del proyecto.

En esta misma línea, para el caso del material fresado, se ha conseguido dosificar una mezcla compuesta en un 20% del volumen por este material, tasa propia de una mezcla tipo hormigón bituminoso (AC), pero considerando que se trata de una mezcla drenante se puede hablar de una tasa muy elevada.

Por otro lado, se ha logrado cumplir todos los requisitos exigidos a nivel de laboratorio para este tipo de mezclas por el PG-3, además, ha cumplido los parámetros mínimos bajo las condiciones de mayor exigencia, es decir, bajo las condiciones de mayor tráfico pesado y para cualquier zona climática del territorio español.

Futuras líneas de investigación

Continuar con la caracterización de la mezcla drenante, analizando los distintos modos de fallo que puedan presentarse en este tipo de mezclas de cara a una simulación más completa de la sección de firme mediante software.

Dosificación de una mezcla discontinua (BBTM) manteniendo los mismos objetivos del presente trabajo, es decir, con un esqueleto mineral compuesto en un 100% por materiales reciclados (escoria y fresado), intentando maximizar la cantidad de fresado.

Fabricar y determinar el comportamiento de las mezclas estudiadas (Drenante y discontinua) sustituyendo el betún utilizado por un betún mejorado mediante técnicas de nanotecnología.

Analizar el comportamiento de dichas mezclas mediante la utilización de software específico ahondando en las posibilidades ofertadas por el mismo, determinando el efecto del tiempo sobre la mezcla (envejecimiento) y la influencia de la variación climática.

ABSTRACT

DISEÑO DE UNA MEZCLA BITUMINOSA DRENANTE CON ALTAS TASAS DE MATERIAL RECICLADO

DESIGN OF A POROUS ASPHALT MIXTURE CONTAINING HIGH RATES OF RECLAIMED MATERIAL

AUTHOR: Israel Rodríguez Fernández

MANAGERS Daniel Castro Fresno
Pedro Lastra González

CALL: Septempber, 2015

Key words

DURABROADS, Porous asphalt, Sustainable mixtures, Reclaimed Asphalt Pavement (RAP); Electric Arc Furnace slag, Mechanistic-empirical pavement design, 3D-Move Analysis.

Content

This work is part of the activities that integrate the DURABROADS project. This project, funded by the European Community, is one of the main lines of investigation of the "Grupo de Investigación de Tecnología de la Construcción" (GITECO), working with the "Grupo de Caminos de Santander" (GCS).

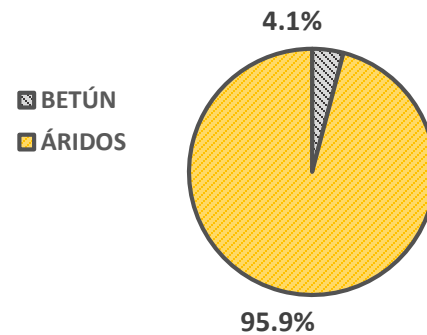
This work deals with the use of recycled paving materials, and more particularly with bituminous mixtures used in the surface layer. The type of mixture studied in the project is a porous asphalt (PA 16) and the recycled materials used are slag from electric arc furnace and recycled asphalt pavement (RAP).

Two objectives are in this project:

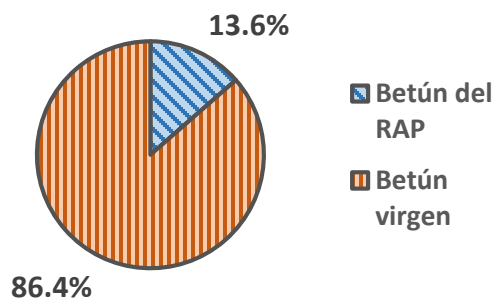
- Design a mixture with 100% of recycled material
- Use 20% or above of RAP in the mixture

The asphalt mix design is as follows:

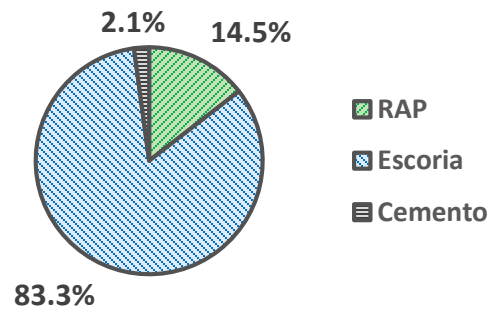
Mineral materials	95,9 %
Slag	83,3 %
RAP	14,5 %
Cement	2,1 %
Bitumen	4,1 %
RAP	13,6 %
Convencional bitumen	86,4 %
Relation filler/bitumen	0,93 %



Bitumen composition:



Mineral materials composition



Laboratory tests applied to the mixture are as follow:

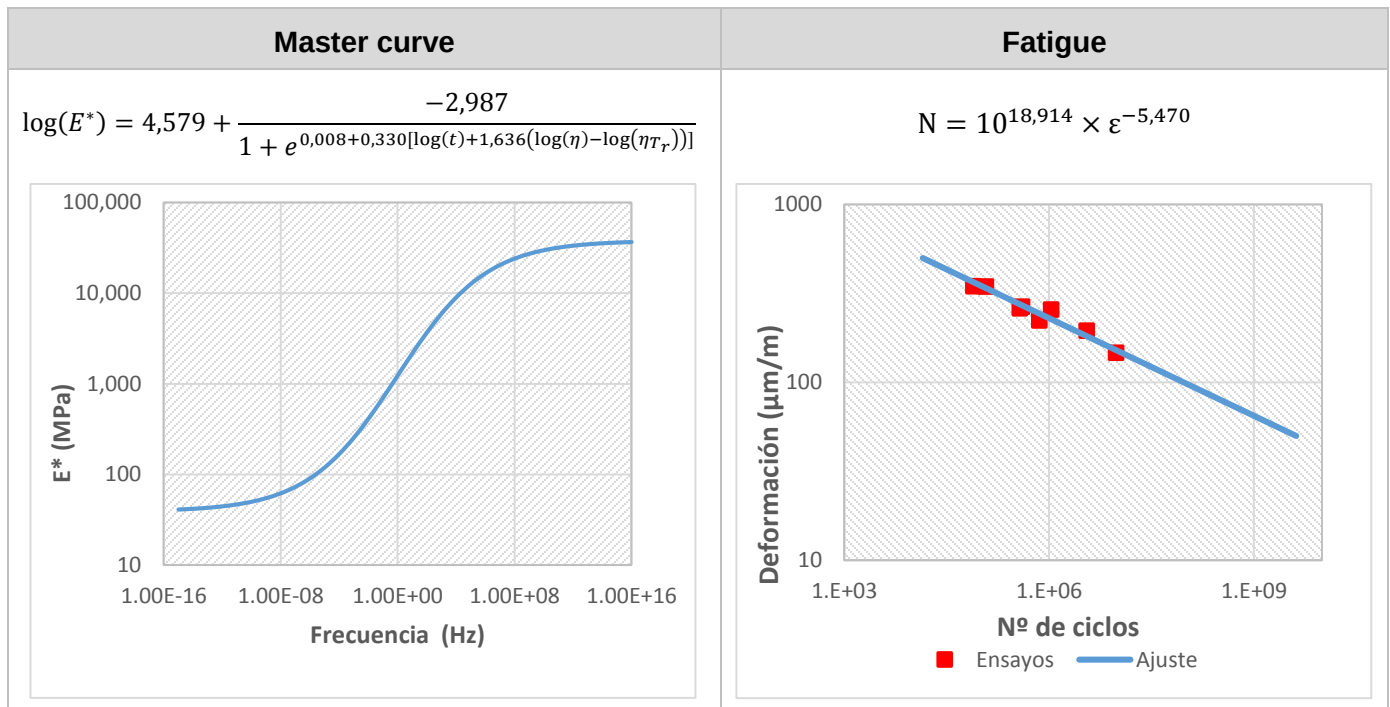
Test	Result	Requirement
Density (gr/cm ³)	2,548	-
Porosity (UNE 12697-8) (%)	19,99	≥ 20
Particle loss (UNE 12697-17) (%)	12,6	< 20 *
Particle loss (damp) (NLT-362) (%)	30,4	< 35 **
Effect of water (UNE 12697-12) (% ITRS)	87,7	> 85

* Traffic category T00 to T2

** Traffic category T00 to T1

Mechanical characterization tests:

- Dynamic modulus
- Fatigue

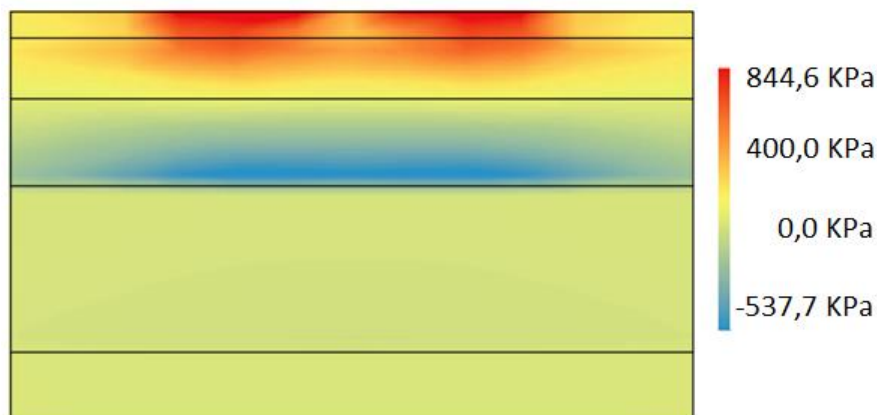


Finally, the mixture performance was analyzed in a pavement using the "3D-Move Analysis" program. Lifespan of this pavement is estimated to be 25 years.

Summary of calculation by software:

Layer	Failure	Model equation
PA 16	Fatigue	$N = 10^{18,914} \times \varepsilon (\mu m/m)^{-5,470}$
AC22 S	Fatigue	$\varepsilon (\mu m/m) = 6,925 \times N^{-0,27243}$
AC32S	Fatigue	$\varepsilon (\mu m/m) = 6,925 \times N^{-0,27243}$
Subgrade	Rutting	$\varepsilon_z (\mu m/m) = 2,16 \times 10^4 \times N^{-0,28}$

Tensión horizontal (σ_{xx})



Conclusions

The first conclusion drawn from this study is that slag and RAP are two materials suitable for use in porous asphalt. Based on the properties analyzed with the software, and in the absence of continuation to analyze the pavement, the experimental mixture has shown good performance in the lab, with a lifespan of around 25 years, much higher than usual in this type of mixtures.

At mix level, the technical feasibility of a porous mixture with 100% of recycled material has been demonstrated. It fulfills the main goal set at the beginning of the project.

In the same vein, in the case of RAP, the design of a porous asphalt mixture with a rate of 20% of RAP has been possible. This rate is more common in asphalt cement mixtures.

Finally, point out that the mixture passed all the requirements proposed in the laboratory tests (PG-3) for the extreme conditions of traffic and climate.

Future research

Continue with the characterization of the mixture. Analyzing the various failure modes that can occur in these types, completing the simulation by software.

Dosing of a "Beton Bitumineux Mince" (BBTM), maintaining the same objectives of this study, that is, with mineral materials composed from recycled materials (slag and RAP), trying to maximize the amount RAP.

Determine the behavior of the studied mixtures with improved bitumen using nanotechnology techniques.

Analyze the behavior of such mixtures by using specific software, delving more deeply into the possibilities offered by this. Determine the effects of time on the mixture (aging) and the influence of climatic variation.

AGRADECIMIENTOS

Gracias al Grupo de Investigación de Tecnología de la Construcción (GITECO), y en especial, a su director Daniel Castro Fresno, por acogerme y darme la oportunidad de formar parte de este grupo y poder desarrollar trabajo.

Gracias a Pedro Lastra González, uno de los directores de este trabajo y un compañero sin el cual no hubiese sido posible la realización del mismo. Desde aquí, mi más sentido agradecimiento.

Gracias al resto de personas que forman parte del grupo, en especial a Pablo Pascual Muñoz e Irune Indacoechea Vega, ya que han estado directamente involucrados con mi trabajo.

Gracias al personal de laboratorio, sin ellos hubiese sido imposible la realización de este trabajo, y en especial, gracias a Miguel Gómez Beares y Jaime Carpio García.

ÍNDICE

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	15
1. INTRODUCCIÓN.....	16
1.1. Antecedentes.....	17
1.2. Objetivos.....	17
CAPÍTULO II ESTADO DEL ARTE.....	18
1. MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE.....	19
1.1. Mezclas bituminosas en caliente	20
1.2. Mezclas bituminosas para capas de rodadura.....	20
2. MATERIALES	23
2.1. Utilización del material procedente de fresado (RAP)	24
2.2. Utilización de escoria negra de arco eléctrico	30
3. DISEÑO DE FIRMES DE CARRETERA	32
3.1. Diseño de firmes de carretera	33
3.2. Métodos de diseño	33
CAPÍTULO III DISEÑO DE LA MEZCLA EXPERIMENTAL (PA 16)	36
1. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	37
1.1. Materiales utilizados	38
1.2. Ensayos realizados	39
2. RESULTADOS.....	41
2.1. Introducción	42
2.2. Ensayos de caracterización de materiales	42
2.3. Ensayos de dosificación de las mezclas.....	45
2.4. Ensayos de caracterización mecánico-empírica de las mezclas.....	48

CAPÍTULO IV	ANÁLISIS DE LA MEZCLA MEDIANTE SOFTWARE.....	52
1.	SOFTWARE UTILIZADO	53
1.1.	3D-Move Analysis.....	54
2.	CRITERIOS PARA EL ANÁLISIS MEDIANTE SOFTWARE	55
2.1.	Introducción	56
2.2.	Paquete de firme seleccionado para el análisis.....	56
2.3.	Criterios de fallo	57
2.4.	Leyes de comportamiento asociadas a cada material.....	58
2.5.	Cargas aplicadas.....	58
2.6.	Tráfico de proyecto considerado	59
3.	RESULTADOS DEL ANÁLISIS MEDIANTE SOFTWARE.....	60
3.1.	Resultados en términos de tensión y deformación	61
3.2.	Análisis en rotura de la sección.....	66
3.3.	Vida útil de la sección de firme	67
CAPÍTULO V	CONCLUSIONES	68
1.	CONCLUSIONES.....	69
1.1.	Conclusiones.....	70
2.	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	71
2.1.	Futuras líneas de investigación	72
CAPÍTULO VI	REFERENCIAS.....	73

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El presente trabajo es una parte de las actividades que configuran el proyecto DURABROADS, este proyecto, financiado por la Comunidad Europea, es una de las principales líneas de investigación del grupo de Grupo de Investigación de Tecnología de la Construcción (GITECO), trabajando conjuntamente con el Grupo de Caminos de Santander (GCS).

El proyecto DURABROADS tiene como objetivo principal proporcionar un crecimiento sostenible a través del desarrollo y la demostración de pavimentos duraderos, amigables con el medioambiente, resistentes y económicamente viables. Estos pavimentos se basan en el uso de la nanotecnología para el diseño de asfaltos con propiedades mejoradas. DURABROADS se dirige también a la optimización de técnicas de construcción, reciclaje y reutilización de materiales, mantenimiento y rehabilitación más segura, ecológica y duradera.

1.2. Objetivos

El presente trabajo se sitúa en la línea de la utilización de materiales reciclados en pavimentos, y más concretamente en mezclas bituminosas utilizadas en la capa de rodadura. El tipo de mezcla sobre el cual se desarrolla el proyecto, es una mezcla drenante tipo PA 16 y los materiales reciclados a utilizar son la escoria negra procedentes de la fabricación del acero en horno de arco eléctrico y el material procedente del fresado de carreteras.

Con todo ello, se plantea un doble objetivo, por un lado, diseñar una mezcla cuyo cuerpo mineral este compuesto en un 100% por materiales reciclados, y por otro lado, que el contenido de material procedente de fresado alcance tasas propias de los hormigones bituminosos utilizados en capas de base (20-30%).

CAPÍTULO II ESTADO DEL ARTE

1. MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE

1.1. Mezclas bituminosas en caliente

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

Las distintas combinaciones entre los materiales que componen la mezcla bituminosa (cantidades, tipos, etc.) permiten la existencia de una gran variedad de tipos, y por tanto, una gran variedad de usos de las mezclas bituminosas. Nos encontramos mezclas bituminosas principalmente en el sector transporte (carreteras, aeropuertos, etc.), pero también podemos encontrar su uso en recreación (pistas de tenis, carriles bici, pistas de juegos, etc.), industria (puertos, naves industriales, etc.) o edificación (pavimentos).

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

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

Con más de 5 millones de kilómetros de carreteras construidos en toda Europa, y pese a que no se construyera ningún nuevo tramo de carretera, solamente con la conservación y renovación del firme de las carreteras existentes se precisa de una producción considerable de mezcla asfáltica. En este mismo sentido, al igual que se requiere de una gran producción, la renovación del firme genera residuos en un volumen considerable.

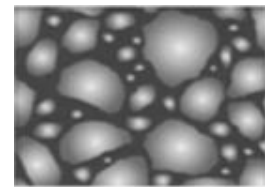
1.2. Mezclas bituminosas para capas de rodadura

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

La normativa Española permite el uso de tres tipos distintos de mezclas bituminosas para la capa de rodadura, las mezclas tipo hormigón bituminoso (AC), las mezclas porosas (PA) y las mezclas discontinuas (BBTM). Cada tipo de mezcla tiene sus peculiaridades y se ajusta mejor o peor a unas determinadas condiciones, en este sentido, en cada caso será necesario evaluar que tipología es la más apropiada. Según la “European Asphalt Pavement Association (EAPA)”, el 51,9% de la producción de mezclas bituminosas en España es utilizado en capas de rodadura, siendo el 91.9% mezclas de tipo hormigón bituminoso, el 7,7% mezclas de tipo discontinuo y el 0,4% mezclas porosas. Las características más relevantes de cada mezcla son las siguientes:

Hormigón Bituminoso (AC)

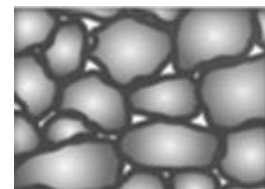
Son mezclas cerradas con un porcentaje de huecos entre el 4% y el 6%, son por lo tanto mezclas impermeables. Para capas de rodadura su espesor está limitado entre 4cm y 5cm, aunque pueden tener espesores mayores en capas de base o intermedias. Pueden utilizar tanto betún convencional como modificado,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



AC

Mezclas discontinuas (BBTM)

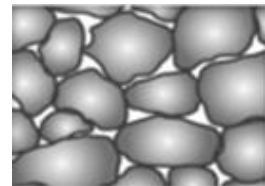
Su granulometría presenta una fuerte discontinuidad entre los 2mm y los 8mm, por lo que son firmes rugosos con alta drenabilidad superficial. Igual que ocurre con las mezclas porosas, su utilización se limita a capas de rodadura y con betún modificado. Tienen el menor espesor de las tres capas: entre 2cm y 3cm, y su proporción mínima de ligante sobre el peso de la mezcla es la más alta: 4,75% con áridos de 2,65 gr/cm³ de densidad media.



BBTM

Mezclas Porosas (PA)

Su característica principal es su alto contenido de huecos (superior al 20%), esto provoca que el agua drene por su interior, así su capa inmediatamente inferior debe ser impermeable para evitar que el agua penetre en el interior de la estructura. Suelen emplearse en zonas lluviosas no muy frías, ya que las heladas provocan su fragmentación. Únicamente se utilizan como capa de rodadura, y casi exclusivamente con betún modificado para mantener una buena cohesión a pesar de los huecos. Su proporción mínima de ligante sobre la masa es del 4,3% (para áridos con una densidad media de 2,65 gr/cm³). Tienen un espesor de entre 3cm y 5cm.



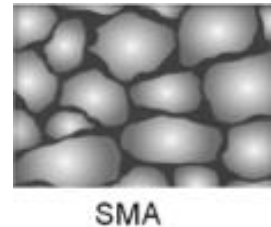
PA

Pero no todas las mezclas utilizadas en capas de rodadura son de alguno de estos tres tipos, en otros países existen otros tipos que también son utilizados. Destacan las mezclas bituminosas tipo SMA (Stone mastic asphalt), ampliamente utilizadas, las mezclas tipo SA (soft asphalt), utilizadas en los países nórdicos, y las mezclas conocidas como másticos bituminosos.

Dada la extensa utilización de la mezclas tipo SMA en capas de rodadura que hay en algunos países Europeos (el 10% de la producción total de mezcla bituminosas en Alemania en 2013, el 25% en Suecia y el 22,5% en Luxemburgo, entre otros), se explican a continuación, brevemente, sus principales características.

Mezclas tipo SMA

Estas mezclas, desarrolladas en Alemania a finales de los años sesenta, se idearon con la finalidad de conseguir un pavimento con la máxima resistencia al desgaste y deterioro, capaz de soportar el daño causado por los neumáticos de clavos utilizados en esa época. Se caracteriza por su alto contenido en áridos gruesos y su distribución en un esqueleto de estructura controlada. Los vacíos de la matriz estructural están llenados por un mastic bituminoso de alta viscosidad. Las mezclas de SMA tienen un contenido de asfalto entre 6,5 y 7,2%. Esta mezcla requiere de la utilización de fibras celulósicas, que no modifican químicamente al betún, pero intervienen en las propiedades físicas permitiendo incrementar el contenido del mismo.



SMA

En el siguiente gráfico se muestra, a modo de ejemplo, como se distribuye la utilización de un tipo u otro de mezcla en función del país (año 2013). Vemos como la tipología más utilizada en todos los países es la mezcla bituminosa convencional (AC), a partir de ahí, cada país muestra unas preferencias por uno u otro tipo, en función, de las condiciones o preferencias de cada uno.

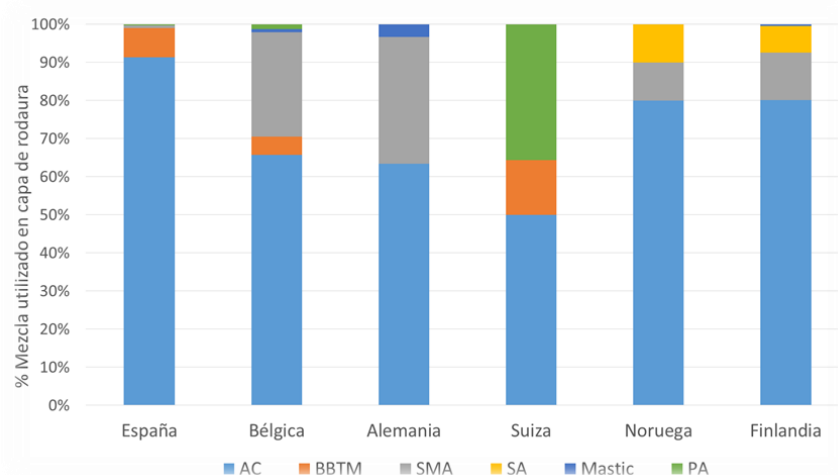


FIGURA 01 – Uso de los distintos tipos de mezclas según países

2. MATERIALES

2.1. Utilización del material procedente de fresado (RAP)

El agotamiento estructural de un firme, causado, por ejemplo, por la propagación ascendente de fisuras generadas por fenómenos de fatiga, o el agotamiento funcional causado, por ejemplo, por una pérdida de rugosidad superficial del pavimento, no supone, a priori, que los materiales que configuran ese firme hayan dejado de ser válidos para formar parte de una nueva mezcla bituminosa similar a la que han formado parte durante todo ese tiempo.

Esta afirmación, más evidente en el caso de los áridos, puede no ser del todo cierta en el caso del ligante, al cual, el paso del tiempo le ha causado un envejecimiento y una variación de sus propiedades respecto a las de partida. En este sentido, se ha demostrado que con tasas de material reciclado del orden del 25 – 30%, se obtiene un ahorro en ese mismo porcentaje de áridos nuevos y en torno a un 1% en ligante.

En el plano económico, de los cuatro costes principales en que podemos clasificar la producción de una mezcla bituminosa en caliente (materiales, fabricación en planta, transporte y puesta en obra) el principal es el asociado a los materiales, debido especialmente al coste del ligante, por tanto, un ahorro en este material puede suponer un ahorro importante en el conjunto.

No obstante, la utilización de material procedente de fresado (RAP) presenta ciertos inconvenientes en este sentido, donde la necesidad de fresado, el transporte, el tratamiento, el almacenamiento y la posterior producción de la mezcla (calentamiento del RAP, uso de ligante especial, etc.) traen asociados unos costes, que, dependiendo de la situación, serán más o menos importantes.

Tubo que ocurrir una situación favorable económicamente para que el uso de este material sufriera un impulso y se desarrollara la tecnología asociada al mismo. Esta situación fue en los años setenta, cuando tuvo lugar la conocida como primera crisis del petróleo, en la cual, la Organización de Países Árabes Exportadores de Petróleo decidió no exportar más petróleo a los países que habían apoyado a Israel durante la guerra, lo cual incluía a Estados Unidos. Durante esta época, el precio del petróleo ascendió notablemente en Estados Unidos, y bajo este marco, la Federal Highway Administration (FHWA) financió una serie de proyectos encaminados a demostrar la viabilidad de utilizar este tipo de materiales.

En la actualidad, los beneficios que al medio ambiente aporta el reciclado de este material han impulsado aún más el interés de su utilización. En Europa, diversos proyectos han sido puestos en marcha en este sentido, el proyecto GreenRoads o el proyecto DurabRoads son algunos ejemplos. La reutilización del material fresado no solo supone un ahorro de material virgen sino que también reduce la cantidad de material llevado a vertedero, entre otros beneficios, como por ejemplo, un ahorro en el transporte (técnicas de reciclado “in-Situ”).

Hoy en día, con la evidencia de los beneficios que la utilización de este material aporta, se ha generalizado su uso y existen normativas que lo regulan. En Europa, normas como la UNE-EN 13108-7, relativa a mezclas drenantes, establecen apartados específicos regulando el empleo de material procedente de fresado de firmes. En España, el PG-3, permite emplear material fresado de mezclas bituminosas en caliente en proporciones inferiores al 15% en capas de base e intermedias, sin que ello suponga la necesidad de un estudio especial de la mezcla. Para tasas mayores, hay que recurrir a técnicas de reciclado, donde el procedimiento de fabricación cambia respecto al procedimiento convencional. En España, en el anejo a la orden circular 8/2001 sobre reciclado de firmes (PG-4), considera como mezclas recicladas en central en caliente a aquellas que tienen una cantidad de RAP entre el 10 y el 50% de la masa total de la mezcla.

Pese a esta limitación en el contenido de RAP, en España existen tramos experimentales con proporciones mayores al 50%. En torno al proyecto fénix, se ejecutan varios tramos con proporciones entre el 40 y el 60% de material reciclado (A-140 en Huesca, Autopista A-7 en Murcia y N-230 en Lérida). De forma general, en España, las tasas utilizadas de RAP en las mezclas recicladas se sitúan entre el 10–20%.

En Estados Unidos, el uso de RAP en las mezclas bituminosas está generalizado, y los porcentajes del mismo permitidos son mayores que en España, incluso, se permite su utilización (y se usa) en la capa de rodadura. Las siguientes imágenes muestran la permisividad en el uso de RAP de los distintos estados y el uso real del mismo:

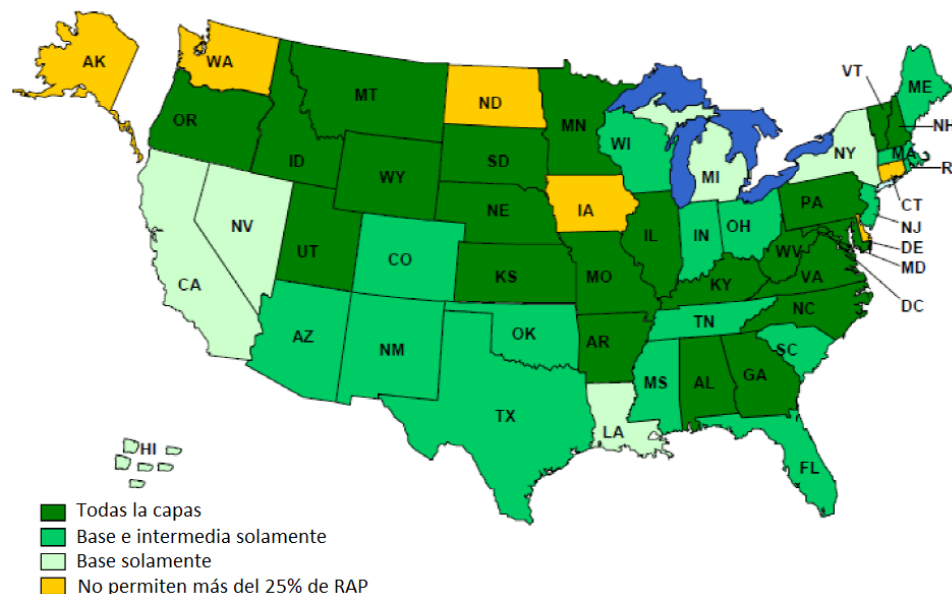


FIGURA 02 - Estados que permiten el uso de más de un 25% de RAP

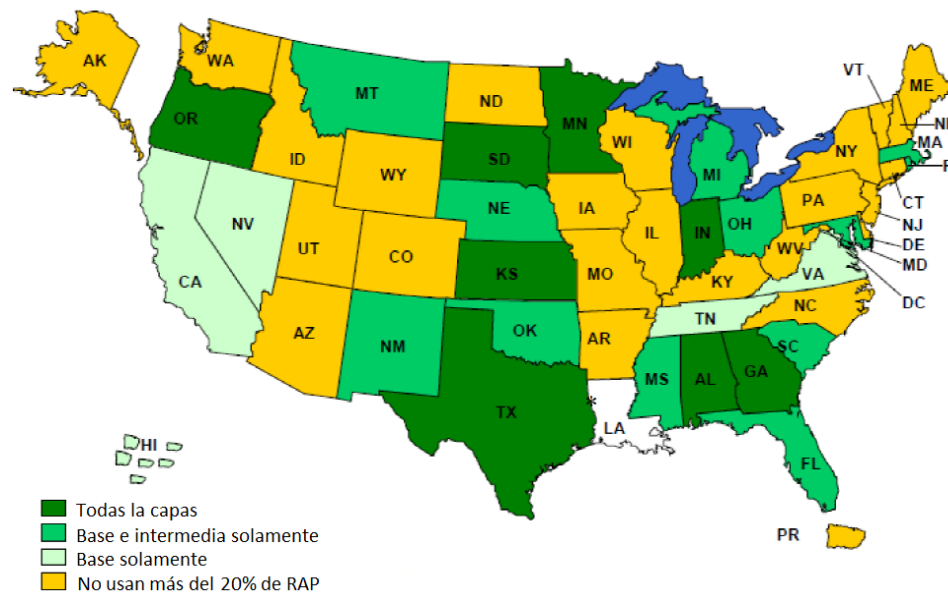


FIGURA 03 - Estados que usan más de un 20% de RAP

En Europa, las distintas legislaciones establecen umbrales máximos para la utilización de RAP en las mezclas bituminosas. Poder alcanzar los máximos niveles permitidos de utilización de RAP vendrá determinado por una serie de condicionantes técnicos, por un lado está el diseño de la mezcla, donde el tipo de mezcla y las propiedades de la misma junto con las propiedades y homogeneidad del material reciclado disponible determinarán la cantidad del mismo que se puede utilizar. Por otro lado, el proceso de fabricación (técnica en frío, en caliente, etc.), incluyendo la necesidad de una determinada tipología de planta (capacidad, unidades de alimentación de material reciclado, etc.), o condicionantes como la humedad del material determinaran las posibilidades reales de reciclado.

País	Porcentaje de RAP máximo permitido para su uso en MBC		
	Capa de rodadura	Capa intermedia	Capa base
Alemania	100%		
Bélgica	25%		50%
Dinamarca	30%	30%	100%
España		50%	
Francia		40%	
Irlanda	10%	50%	50%
Polonia	10%		50%
Reino Unido	10%		50%
Suecia	20%		30%

TABLA 01 – Uso de RAP permitido según el país

Por otro lado, si nos centramos en las propiedades que el material reciclado debe tener para formar parte de una mezcla bituminosa, encontramos que la mayoría de las normativas exigen a estos materiales los mismos requisitos que se le exigen a los materiales vírgenes. El principal problema que surge no es tanto cumplir esas restricciones sino más bien en la gran heterogeneidad que presenta este tipo de material, heterogeneidad que encontramos dentro de un material con el mismo origen pero que es especialmente destacable entre materiales con distinto origen.

En este sentido, conseguir que exista homogeneidad será el objetivo principal, de hecho, la homogeneidad en algunas de las propiedades (contenido de betún, granulometría, penetración del betún, etc.) es uno de los parámetros que se regulan en algunas normativas.

<i>País</i>	<i>Granulometría</i> <i>por % de masa</i>			<i>Contenido de betún</i> <i>por % de masa</i>	<i>Penetración</i> <i>[1/10 mm]</i>	<i>Punto de reblandecimiento</i> <i>T_{R&B} [°C]</i>
	<i>< 0,063</i>	<i>>0,063; < 2</i>	<i>> 2</i>			
Bélgica ¹⁾	±3		±10	±1	±10	±10
España	±1,5	±3	±5	±0,4	±4	-
Francia	±2-3	±7,5-10		±0,5 - 1	±7,5	±4
Portugal	±1,5	±3	±5	±0,4	±4	-
¹⁾ Si no se alcanza el valor exigido, el contenido de material bituminoso recuperado permitido se reduce a la mitad						

TABLA 02 – Requisitos de homogeneidad para el RAP

Pasando a las técnicas de fabricación utilizadas en la reutilización del material de fresado, podemos diferenciar por un lado en función del lugar donde se ejecuta el tratamiento: “in-situ” o en central, y por otro lado, en función del tratamiento que se le aplica (reciclado en frío, reciclado en caliente, etc.).

El caso que nos compete es el reciclado en central en caliente, este procedimiento consiste básicamente en el transporte hasta una central de fabricación del material fresado, donde se le aplican los tratamientos oportunos (machaqueo, clasificación y homogenización) y se mezcla en caliente con árido virgen y betún. En España, aunque pueden obtenerse mezclas compuestas en un 60-70% por material antiguo, lo más usual es que el porcentaje se encuentre por debajo del 50%.

Actualmente se disponen equipos que permiten el reciclado tanto en centrales continuas como discontinuas, distinguiéndose en la actualidad dos técnicas distintas:

La técnica del sobrecalentamiento del árido virgen de aportación, utilizada en las centrales discontinuas

En esta técnica, el árido virgen se calienta a temperaturas elevadas (200-275 °C, según la tasa de reciclado) para que, al entrar en contacto con el material reciclado no calentado, la temperatura del conjunto sea la deseada. En el mezclador se añade el ligante que se vaya a utilizar. Dentro de esta técnica existen varias posibilidades, según dónde se introduzca el material reciclado (en el mezclador o en las tolvas en caliente). El procedimiento convencional tiene una limitación en la proporción del material reciclado sobre el total de la mezcla fabricada (25-30%), para que la temperatura inicial de los áridos no sea excesiva (<220 °C), ya que, si no, se podría producir una degradación del ligante en el primer contacto.

La técnica del calentamiento indirecto, empleada en las centrales continuas (tambor-secador-mezclador)

En la parte frontal del tambor se introducen los áridos, que se secan y calientan; en medio del tambor se introduce la mezcla que se va a reciclar, y en la parte posterior del mismo se añade el betún. Los áridos actúan como una pantalla para evitar la acción directa de la llama sobre el material reciclado. La mezcla antigua se calienta por transferencia del calor de los áridos. Los materiales se van moviendo a lo largo del tambor por el giro de éste, produciéndose un flujo continuo de material durante todo el proceso. La necesidad de mantener una pantalla de áridos delante de la mezcla reciclada limita de nuevo la proporción de material reciclado en la mezcla final. En la práctica suele irse a proporciones del 10-30%. La temperatura empleada en el proceso es la usual en estas centrales (160 °C).

Ambas técnicas presentan una limitación importante en cuanto a la cantidad de RAP que se puede utilizar (Máximo 30%). Existen modificaciones que permiten aumentar las tasas de material reciclado, destaca por ser un método ampliamente utilizado en Europa, la incorporación de un secador separado para calentar el RAP en las mezclas de tipo discontinuo, de forma que, cuando este se mezcla con el árido virgen ya posee una cierta temperatura. Este sistema, aunque comparativamente con los sistemas anteriores es un sistema muy caro, tiene la ventaja de que se pueden utilizar proporciones de RAP hasta del 50–60%.

De los distintos tipos de centrales continuas, el más conveniente medioambientalmente (menores emisiones) y que permite tasas de reciclado de hasta un 40% es el tipo secador-mezclador de doble tambor. Con este sistema se consigue una mezcla muy homogénea de RAP y árido virgen antes de añadir el ligante nuevo.

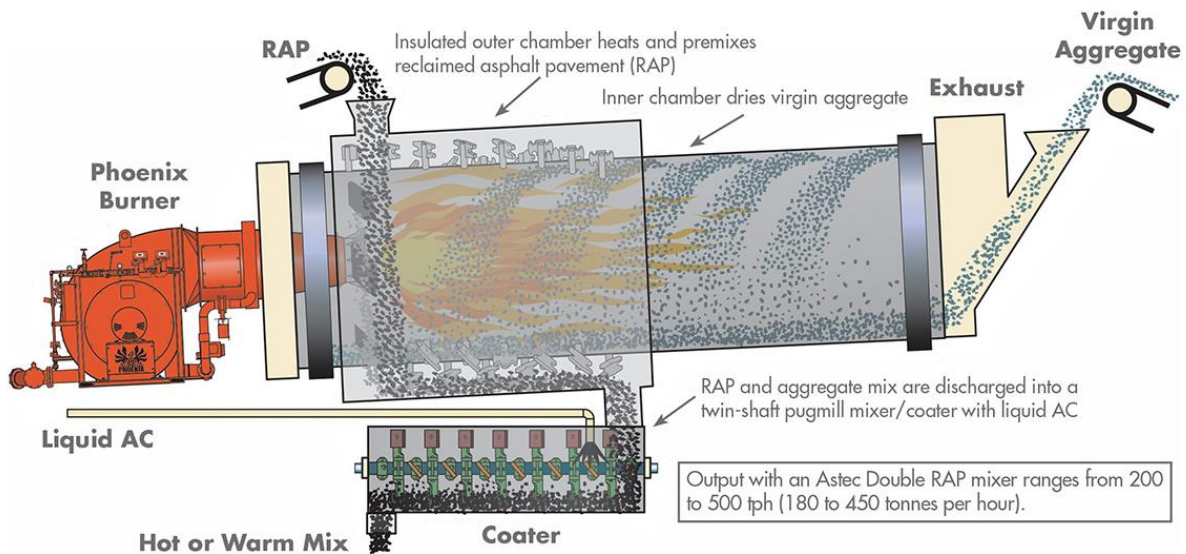


FIGURA 04 – Esquema de una central continua tipo secador-mezclador de doble tambor.

Actualmente existe otra técnica que permite conseguir tasas de material reciclado entre el 85 y 100%, basada en la utilización de microondas. Esta técnica, además, preserva totalmente al ligante de cualquier riesgo de oxidación por la exposición a gases calientes en el momento del mezclado.

Existen varias centrales de este tipo en funcionamiento en Estados Unidos, y alguna en Europa (Rotterdam). Estas plantas, además, presentan la ventaja de no tener ningún tipo de problema relativo a emisiones de gases contaminantes. Por el contrario, los costes de adquisición y operación son el principal inconveniente de su uso.

2.2. Utilización de escoria negra de arco eléctrico

Durante el proceso de fabricación del acero en las acerías de horno de arco eléctrico se generan una serie de subproductos, uno de ellos conocido como escoria negra. Este subproducto tiene su origen en la fase de fusión, en esta fase, se busca eliminar las impurezas que contienen las materias primas (generalmente chatarra) y es precisamente con esas impurezas con las que se forma la escoria negra. Este material en principio puede ser utilizado como árido en mezclas bituminosas.

En España existen un total de 24 acerías de horno eléctrico de arco. La producción de acero en el año 2013 se situó en 14,8 millones de toneladas, siendo el País Vasco la comunidad con mayor producción (48%), seguido de lejos por Cataluña y Andalucía. Cantabria fue el cuarto productor de acero en 2013 con un 7,6% de la producción total, lo que supone una cantidad de 1.125.000 toneladas de acero. Considerando que la producción habitual de escoria negra es de 110 a 150 Kg por cada tonelada de acero, en 2013 se produjeron en España aproximadamente 1.600.000 toneladas de escoria negra (120.000 toneladas en Cantabria).

En el mismo año 2013 en España se produjeron un total de 13,2 millones de toneladas de mezcla bituminosas. Teniendo en cuenta que en una mezcla normal en torno al 95% de la mezcla (en peso) lo forman los áridos, podemos hablar de una cantidad de áridos empleada de 12,5 millones de toneladas. Comparando ambas cantidades, vemos como con la escoria negra abarcamos un 12,8% (en peso) de la necesidad de árido en un año, lo que nos da una idea de las grandes cantidades de escoria negra que se manejan.

La valorización de la escoria en Cantabria está regida por el Decreto 104/2006, que recoge distintas clasificaciones de la escoria en función de sus características, parámetros admisibles para su utilización y condiciones de uso. Se especifica en dicho decreto a la escoria negra como materia apta para su utilización en carreteras como capa de pavimento de mezcla bituminosa, siempre que cumpla unos parámetros medioambientales y técnicos (Gobierno de Cantabria, 2006). Entre los parámetros que debe cumplir se encuentran sus niveles de lixiviados, limitando las cantidades máximas permitidas de determinados componentes (Bario, Arsénico, Cadmio...), debiendo ser enviada a vertedero en caso de sobrepasarlas.

La escoria negra, dadas sus propiedades físicas, se adecua perfectamente para su uso en mezclas bituminosas, y sobre todo, para capas de rodadura, siempre y cuando su tratamiento haya sido el adecuado.

De las propiedades más destacadas encontramos la buena resistencia a la abrasión, fragmentación y compresión, además de ser un material duro con bajos coeficientes de los ángulos (en torno al 20%) y alto coeficiente de pulimento acelerado (0,5–0,6).

De diferentes estudios realizados en los últimos años se concluye que la escoria negra presenta buen comportamiento en mezclas bituminosas, pero este es especialmente bueno, incluso superando al árido convencional, cuando la escoria se utiliza en la fracción gruesa del árido.

Sin embargo, el principal inconveniente que presentan las escorias negras está relacionado con los problemas que, en determinadas condiciones, presentan de expansividad. Fenómenos como la hidratación de la cal libre (CaO) y la magnesita (MgO), la corrosión y oxidación del hierro metálico residual, la transformación de fase del silicato dicálcico y la carbonatación del hidróxido cálcico son los responsables de un considerable aumento de volumen en la escoria negra. Con buen tratamiento de las escorias, sobre todo durante el proceso de enfriado, se puede reducir considerablemente el potencial expansivo de las mismas.

El uso en España de este material en las mezclas bituminosas está siendo cada vez más habitual en los últimos años, donde se han realizado varios tramos de prueba que incorporan cantidades variables de escoria negra en las mezclas. Algunos ejemplos son el “Eje Ballonti”, que utiliza el 100% del árido compuesto de escoria, o la carretera Gi-2133, que utiliza escoria en árido grueso. En otros países el uso está más extendido, por ejemplo, en Estados Unidos, en el año 2011, se llegaron a vender 15,4 millones de toneladas de escoria de acero por un valor de 257 millones de dólares, de las cuales, casi la mitad se utilizaron en capas asfálticas.

Este aumento en la utilización de este material está justificado desde dos puntos de vista. En primer lugar, supone un importante beneficio medioambiental, principalmente por tres razones:

- Una disminución de los costes de vertido, a la vez que un ahorro de materia prima natural derivado de la reutilización de los subproductos de acería.
- Reducción del impacto medioambiental y un beneficio espacial al mantener los vertederos sin ocupar, no depositando los residuos en vertedero.
- Incremento de la calidad de vida en los alrededores de este tipo de industrias.

El segundo lugar, la revalorización de este material supone un beneficio económico importante para sus productores. Solo el mero hecho de no tener que transportar el material a vertedero (práctica habitual hasta hace relativamente poco) supone un importante ahorro para el productor, tanto en canon de vertido como en transporte. Además, pese a no existir aún un precio de venta fijo en España, es de esperar que con el tiempo se establezca y este material pueda generar cierto beneficio económico a sus productores.

3. DISEÑO DE FIRMES DE CARRETERA

3.1. Diseño de firmes de carretera

Para dimensionar firmes, tanto flexibles como rígidos, existen gran variedad de métodos y modelos de comportamiento, que podemos clasificar en dos grandes grupos, analíticos o empíricos. En cualquier caso, y sea cual sea el método de cálculo adoptado, el fin que se persigue no es otro que proyectar una estructura multicapa económicamente satisfactoria que sea capaz de servir como soporte a la rodadura de los vehículos durante un tiempo mínimo adecuado y previsto sin que los materiales que la constituyen ni las capas de suelo subyacentes se deformen de forma excesiva.

Sea cual sea el método de diseño que se vaya a utilizar, se han de tener en consideración una serie de factores que afectan a dicho diseño. De todos los posibles factores, podemos clasificar como los más relevantes

El tráfico

El tráfico que circulará sobre la carretera es el principal agente causante de daño sobre el pavimento. En especial, es la fracción de tráfico más pesado la causante de la mayor parte del daño, y por tanto su correcta cuantificación y previsión será esencial en el diseño.

La explanada

La capacidad portante de la explanada, influencia por varios factores como puede ser la humedad o las características de los materiales que la forman, es un aspecto fundamental que debe ser tenido en cuenta durante el diseño. Otros comportamientos de la explanada, como posibles variaciones de volumen ante cambios en la humedad, también deben ser evaluados y considerados en el diseño.

El clima

La temperatura a la que se encuentra una mezcla bituminosa, el régimen de lluvias de la zona donde se encuentra la carretera o la presencia de hielo o nieve sobre el pavimento son aspectos que influyen directamente en la tipología de firme a utilizar y en los materiales.

3.2. Métodos de diseño

En cuanto a los métodos de diseño, los hemos clasificado como métodos analíticos o empíricos. El procedimiento analítico de dimensionamiento de un firme se basa en la formulación de hipótesis previas para posteriormente abordar el cálculo de las tensiones y deformaciones producidas por la acción simultánea de las cargas del tráfico y las generadas por las variaciones térmicas y climáticas, comparando los resultados obtenidos con los valores admisibles en cada caso.

Estos métodos analíticos requieren, como ya se ha comentado, del cálculo de las tensiones y deformaciones que se generan en las distintas capas del pavimento. Ante la necesidad de este cálculo surgieron distintas teorías que daban respuesta a esa necesidad. Entre las teorías más destacadas encontramos:

Teorías bicapa de Burminster y tricapa de Jones

Cada capa es considerada como un cuerpo elástico de tres dimensiones, con adherencia perfecta a las otras capas. Actualmente, debido al masivo empleo de ordenadores, se han generalizado este tipo de métodos ampliando el número de capas a 4 o 5.

Teorías bicapa de Hogg y tricapa de Jeuffroy

La capa superior se asimila a una placa delgada que desliza sobre la superficie de la inferior. El macizo es un sistema bicapa formado por materiales que responden a los principios establecidos por Boussinesq en su teoría sobre macizos semiindefinidos, que son aquellos con superficie finita y profundidad infinita.

Teorías de macizos equivalentes

Elaboradas por Ivanov, Odemark y Nijboer, reemplazan el sistema multicapa por un macizo semiindefinido de Boussinesq equivalente.

Hoy en día se siguen utilizando estas teorías en diversos software de cálculo, sobretudo la teoría de Burminster, pero poco a poco se han ido imponiendo los métodos de cálculo basados en elementos finitos. Su desarrollo ha aumentado las posibilidades, tanto de cálculo como de caracterización del comportamiento de los materiales.

Por su parte, los métodos empíricos proporcionan, para cada combinación posible de los factores básicos de dimensionamiento, soluciones que se han obtenido por acumulación de experiencias sobre el comportamiento normal de los firmes en tramos con tráfico real, tramos experimentales con tráfico especial o pistas de ensayo.

Estos métodos han sido los más utilizados en Europa, y de hecho, en varios países, incluido España, aún se mantienen vigentes como los métodos de diseño utilizados. En estos métodos, para unas determinadas condiciones de proyecto, se establece por medio de tablas, ábacos o catálogos las soluciones posibles que satisfacen esas condiciones. Estas soluciones, aunque en primera instancia hayan podido ser calculadas con ayuda de algún método analítico, ha sido la experiencia de su uso en situaciones reales de servicio (o ensayos a escala real) la que ha permitido perfeccionar y desarrollar esas soluciones.

		CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO			
		T00	T0	T1	T2
CATEGORÍA DE EXPLANADA	E1				
	E2				
	E3				

MB Mezclas bituminosas HF Hormigón de firme HM Hormigón magro vibrado GC Gravacemento SC Suelocemento ZA Zahorra artificial

Espesores mínimos en cm

TABLA 02 – Ejemplo de secciones de firme recogidas en la instrucción 6.1 IC

En la actualidad existe una aproximación creciente entre ambos métodos, dando lugar a los conocidos como métodos mecánico-empíricos. De este modo, los métodos analíticos se complementan con formulaciones empíricas de comportamiento, mediante las cuales, se transforman los resultados analíticos de tensión o deformación en, por ejemplo, número de ciclos de carga que resiste una capa a fatiga o milímetros de deformación permanente tras un número de ciclos de carga determinado.

CAPÍTULO III DISEÑO DE LA MEZCLA EXPERIMENTAL (PA 16)

1. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Materiales utilizados

1.1.1. Áridos

Los áridos utilizados y su tamaño asociado son los siguientes:



Material	$T_{m\acute{a}x}$ (mm)	$T_{m\acute{i}n}$ (mm)
Escoria	16	8



Material	$T_{m\acute{a}x}$ (mm)	$T_{m\acute{i}n}$ (mm)
Escoria	8	4



Material	$T_{m\acute{a}x}$ (mm)	$T_{m\acute{i}n}$ (mm)
Escoria	4	2



Material	$T_{m\acute{a}x}$ (mm)	$T_{m\acute{i}n}$ (mm)
Fresado	16	0



Material	$T_{m\acute{a}x}$ (mm)	$T_{m\acute{i}n}$ (mm)
Cemento	0,063	0

Escoria negra de arco eléctrico

Este material ha sido proporcionado por la empresa Global Steel Wire S.A. (GSW), situada en la localidad de Nueva Montaña, en las cercanías de Santander. La valorización de estas escorias de cara a su posterior utilización en cualquier actividad a sido llevada a cabo por, tal y como indica la legislación, por una empresa independiente, en este caso, CODEFER S.L.

Material procedente de fresado de carreteras

Este material tiene su origen en una obra de la región, y ha sido proporcionado por la empresa COPSESA. Sin embargo, el origen del mismo no es conocido. Fue producido mediante fresadora y cortado por el tamaño de 16mm. No se utilizaron en ningún momento aditivos rejuvenecedores.

1.1.2. Ligante

El ligante utilizado es un betún modificado con polímeros tipo PMB 45/80 – 65. Este es un betún asfáltico modificado con polímero obtenido por reacción química entre el ligante base y polímeros de tipo elastomérico, que cumple con las especificaciones recogidas en el artículo 212 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) y las recogidas en la norma UNE EN 14023 para un PMB 45/80 – 65.

Las principales características que clasifican a este betún son su penetración (25°C; 100 gr; 5 s), que está comprendida entre 45 y 80 (medida en 0,1 mm) y el punto de reblandecimiento, el cual se sitúa por encima de 65°C. Para este tipo de betún la temperatura de mezcla se establece entre 160 y 170°C, y la temperatura de compactación entre 155 y 165 °C. Por su parte, la temperatura máxima de calentamiento que puede alcanzar este betún es de 180 °C. La densidad del betún tiene un valor de 1,03 gr/cm³.

1.2. Ensayos realizados

1.2.1. Ensayos de caracterización de los materiales

En el PG-3 se recogen todas las características que deben reunir los distintos materiales de cara a su posible utilización dentro de una mezcla. Para determinar si cada material es apto para su uso se dispone del resultado de una serie de ensayos, ensayos que se recogen a continuación, indicando en que material de los utilizados han sido aplicados.

Ensayo	Referencia	Escoria	Fresado	Ligante
Análisis granulométrico	UNE - EN 933-2		X	
Coeficiente de Los Ángeles	UNE-EN 1097-2	X	X	
Peso específico	NLT 167/74	X	X	
Equivalente de arena	UNE-EN 933-8		X	
Contenido de humedad	NLT-359/98	X	X	
Densidad relativa y absorción	UNE-EN 1097-6	X		
Índice de Lajas	UNE-EN 933-3	X	X	
Coeficiente de Pulimento Acelerado	UNE-EN 1097-8	X		
Expansividad	UNE-EN 1744-1	X		
Lixiviados	UNE-EN 12457-4	X		
Contenido de ligante residual	UNE-EN 12697-1		X	
Análisis granulométrico del árido recuperado	UNE-EN 12697-2		X	
Penetración del ligante residual	UNE-EN 1426		X	
Punto de reblandecimiento del ligante residual	UNE-EN 1427		X	
Penetración del ligante virgen	UNE-EN 1426			X
Punto de reblandecimiento del ligante virgen	UNE-EN 1427			X

1.2.2. Ensayos de dosificación de las mezclas

Huecos en mezcla (UNE 12697-8)

En el caso de mezclas drenantes se deben seguir las indicaciones marcadas por el anexo B de la norma UNE 12697-8 para determinar el contenido de huecos de la mezcla. Este valor, cumplirá los valores mínimos fijados en el PG-3, los cuales se recogen en la siguiente tabla.

Tipo de mezcla	% de huecos
Drenante (PA)	> 20%

Sensibilidad al agua (UNE 12697-12)

El PG-3 recoge que en cualquier circunstancia se comprobará la adhesividad árido-ligante mediante la caracterización de la acción del agua. Para ello, la resistencia conservada en el ensayo de tracción indirecta tras inmersión, realizado a quince grados Celsius (15°C) (norma UNE-EN 12697-12), tendrá el valor mínimo mostrado en la siguiente tabla.

Tipo de mezcla	ITRS (%)
Drenante (PA)	> 85%

Pérdida de partículas (UNE 12697-17) / Ensayo Cántabro (NLT-352)

Para mezclas drenantes se recoge en el PG-3 las limitaciones relativas a los resultados al ensayo de pérdida de partículas (ensayo Cántabro) recogido en la norma UNE 12697-17. El resultado a dicho ensayo no deberá rebasar los siguientes límites:

Tipo de mezcla	Categoría de tráfico pesado	Pérdida de partículas (%)
Drenante (PA)	T00 a T2	20%
	T3 a T42	25%

Ensayo Cántabro Húmedo (NLT-362)

Este ensayo está recogido por la norma NLT-362/92 y estaba recogido en el artículo 542 del PG-3 (ORDEN FOM/891/2004). Este ensayo consiste en realizar el ensayo de pérdida de partículas (cántabro) sobre probetas húmedas tras ser sometidas a un proceso de inmersión en agua durante veinticuatro horas (24 h) a sesenta grados Celsius (60 °C). La limitación que establecía el PG-3 al resultado de este ensayo es el mostrado a continuación.

Tipo de mezcla	Categoría de tráfico pesado	Pérdida de partículas (%)
Drenante (PA)	T00 a T1	35%
	T2 a T42	40%

1.2.3. Ensayos de caracterización mecánico-empírica de las mezclasEnsayo de módulo dinámico

Este ensayo trata de determinar el módulo de elasticidad de la mezcla a distintas frecuencias y temperaturas, y viene regulado por la norma UNE-EN 12697-26. Los resultados obtenidos en este ensayo no tienen ninguna limitación normativa, estos valores son simplemente una característica más de la mezcla que será necesaria en la aplicación del diseño mecánico-empírico de firmes.

Ensayo de fatiga

Este ensayo permite conocer el comportamiento a fatiga de la mezcla y está regulado por la norma UNE-EN 12697-24. Al igual que ocurre con el módulo dinámico, a nivel normativo no existe ninguna restricción para los resultados de este ensayo. El resultado obtenido es una ley de comportamiento a fatiga, que permite predecir, dentro del diseño mecánico-empírico de firmes, la vida útil de la mezcla en términos de fallo por fatiga.

2. RESULTADOS

2.1. Introducción

En el presente capítulo se recogen los resultados de los ensayos anteriormente descritos, comenzando por los resultados de caracterización de los materiales, seguido de los ensayos relativos a la dosificación y diseño de la mezcla y finalizando con los ensayos de caracterización de la mezcla.

2.2. Ensayos de caracterización de materiales

2.2.1. Áridos

Escoria negra de arco eléctrico

Los resultados de los ensayos realizados sobre la escoria se recogen en la siguiente tabla, comparándose, cuando procede, con la exigencia de la normativa.

Parámetro	Normativa	Resultado
Coeficiente de los Ángeles	< 15*	18
Peso específico	-	3,775 gr/cm ³
Contenido de humedad	-	0,2%
Absorción	-	1%
Índice de lajas	< 20**	2
Coeficiente de pulimento acelerado	> 0,56*	0,59
Expansividad	< 3,5%***	0,2 (168 horas)

* Valores para un tráfico T00 y T0

** Valores para un tráfico T00 a T31

*** Valor más restrictivo de la norma UNE-EN 13043:2003

Relativo a los resultados del ensayo de lixiviados, existen normativas en diferentes comunidades autónomas que tratan la valorización de estos materiales. Las comunidades y la normativa asociada son las siguientes:

- Departamento de Ordenación del Territorio y Medio Ambiente de la Comunidad Autónoma del País Vasco. “Decreto 34/2003, de 18 de febrero, por el que se regula la valorización y posterior utilización de escorias procedentes de la fabricación de acero en hornos de arco eléctrico” (BOPV 26 de febrero de 2003).
- Departamento de Medio Ambiente de la Generalitat de Cataluña. “Decreto 32/2009, de 24 de febrero, sobre valorización de escorias siderúrgicas”
- Consejo de Gobierno de la Comunidad Autónoma de Cantabria. “Decreto 104/2006, de 19 de octubre, de valorización de escorias” (BOC Núm. 206 – 26 de octubre de 2006)

En todas estas normas la principal regulación que se establece es en forma de límites de lixiviación permitidos. En la siguiente tabla se recogen las limitaciones establecidas en este sentido por cada una de las normas antes mencionadas y el resultado del ensayo obtenido.

Parámetro	País Vasco	Cataluña	Cantabria	Resultado
Cadmio	0,6	0,04	0,04	< 0,04
Selenio	0,2	0,1	0,1	0,1
Arsénico		0,5	0,5	< 0,1
Bario		20	20	2,21
Cromo total		0,5	0,5	< 0,15
Cobre		2	2	< 0,5
Mercurio		0,01	0,01	< 0,005
Molibdeno		0,5	0,5	0,2
Níquel		0,4	0,4	< 0,5
Plomo		0,5	0,5	< 0,5
Antimonio		0,06	0,06	< 0,01
Cinc		4	4	< 1
Cloruros		800	800	262,42
Fluoruros		18	10	1,09
Sulfatos		1000	1000	< 748
Índice de fenol			1	0,28
COD			500	28,74

Como conclusión extraemos que la escoria es un material apto para su uso en una mezcla bituminosa, y debido a las características que presenta se ha escogido este material para formar la fracción gruesa del árido.

Material de fresado

A continuación, se presentan las características del RAP utilizado para el diseño de la mezcla:

Parámetro	Normativa	Resultado
Coeficiente de los Ángeles	< 15*	24
Peso específico	-	2,502 gr/cm ³
Equivalente de arena	> 55	93
Contenido de humedad	-	0,3%
Índice de lajas	< 20**	11
Contenido de ligante residual (%)		4
Punto de reblandecimiento del ligante residual (°C)		76,1
Penetración ligante residual (0,1 mm)		13

* Valores para un tráfico T00 y T0

** Valores para un tráfico T00 a T31

Tamiz (mm)	% pasa
16	100
8	92,1
4	74,7
2	57,9
0,5	27,7
0,063	12,5

*Granulometría de los áridos*

Tamiz (mm)	% pasa
16	99,8
8	86,9
4	61,4
2	35,6
0,5	4,8
0,063	0,5

*Granulometría del conjunto áridos y ligante*

Concluimos, a la vista de los resultados, que este material es apto para su uso como árido dentro de la mezcla. Por otro lado, destacar que este material aporta una cantidad de betún residual, el cual, ha sufrido un proceso de envejecimiento que se manifiesta en los resultados obtenidos en el ensayo de punto de reblandecimiento y en el ensayo de penetración. Estos resultados caracterizan a este betún como un betún endurecido.

Existe la posibilidad de tratar a este betún con productos rejuvenecedores, posibilidad que no se contempla en este proyecto, intentando mantener las características originales. El criterio adoptado, de cara a la dosificación de la mezcla, es considerar todo el betún residual aportado por el RAP como parte del betún total necesario para la mezcla, por tanto, reduciendo la cantidad de ligante virgen necesaria. Esta última consideración se adopta únicamente como un criterio necesario de cara a la dosificación de la mezcla, sin saber, a priori, cuál será la aportación del betún residual al comportamiento de la mezcla.

2.2.2. Ligante

Las características del ligante utilizado son las recogidas en la siguiente tabla.

Parámetro	Resultado
Punto de reblandecimiento (°C)	69
Penetración a 25 °C (0,1 mm)	55
Penetración a 4 °C (0,1 mm)	8

A partir de estos datos es posible obtener el valor de viscosidad a través de distintas formulaciones teóricas. En el caso del punto de reblandecimiento, a la temperatura que marca dicho ensayo, la viscosidad se establece en 13.000 P (Poise). Por su parte, para el ensayo de penetración, se aplica la siguiente ecuación:

$$\log(\eta) = 10,5012 - 2,2601 \times \log(PEN) + 0,00389 \times (\log(PEN))^2$$

$$\eta = \text{Viscosidad (P)}$$

$$PEN = \text{Penetración (0,1 mm)}$$

Resultando los siguientes valores de viscosidad:

Viscosidad (P)	Temperatura (°C)
1,300 x 10 ⁴	69
3,798 x 10 ⁶	25
2,906 x 10 ⁸	4

2.3. Ensayos de dosificación de las mezclas

El ajuste de la granulometría de los áridos se ha realizado en volumen, debido al gran peso específico de la escoria, de forma que se consigue un volumen de áridos razonable y similar al que se obtiene utilizando áridos convencionales, cuyo peso específico es menor ($\approx 2,65 \text{ gr/cm}^3$).

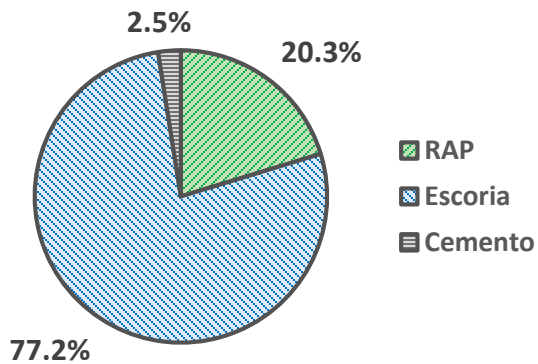
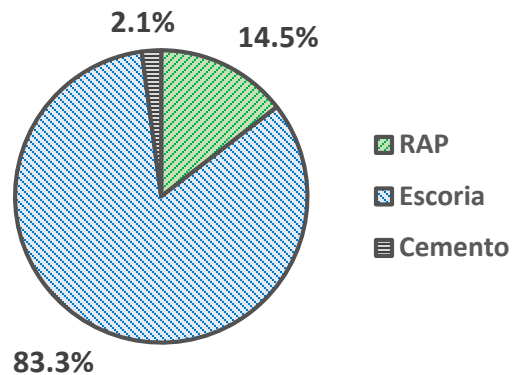
En cuanto a la dosificación, se maximizó el porcentaje de RAP utilizado en todo lo posible, ocupando desde la fracción más gruesa (16 – 8mm), pasando por todos los tamaños y aportando un porcentaje de polvo mineral. Además, el RAP aporta el ya mencionado betún residual, el cual se ha cifrado en un 4% del peso del propio RAP.

En cuanto a la escoria, se utiliza en las fracciones más gruesas del árido y se dispone clasificada por tamaños, de forma que se puedan completar estos tamaños sin tener que recurrir a materiales convencionales, lo cual, iría en contra del objetivo del proyecto.

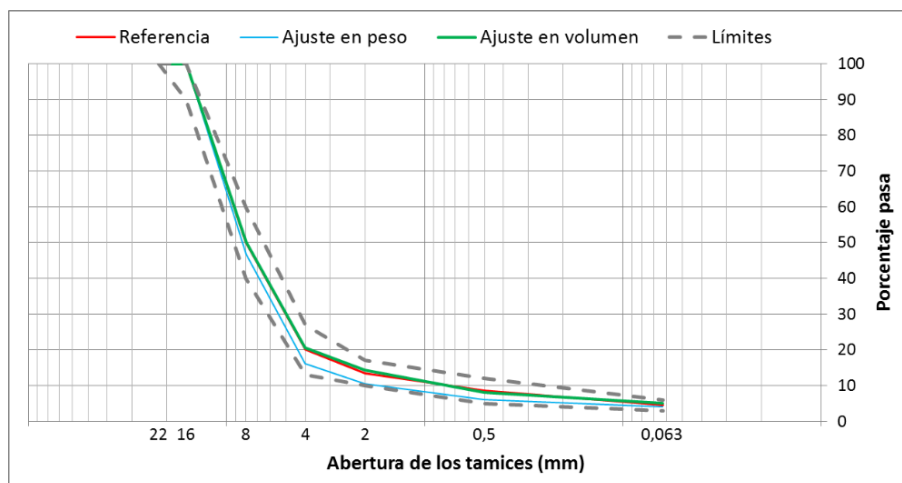
Una vez ajustada la granulometría y determinados los porcentajes de cada material necesarios, se procede a la dosificación, tras el cual se obtiene el porcentaje de ligante con el cual la mezcla obtiene un mejor comportamiento. Para ello, se recurre a los ensayos ya comentados en el apartado 1.3.2. “Ensayos de dosificación de las mezclas”.

2.3.1. Materiales utilizados como árido

Material	Tamaño de árido	% Volumen	% Peso
Escoria	16 # 8	48,20	52,03
Escoria	8 # 4	26,00	28,07
Escoria	4 # 2	3,00	3,24
RAP	16 # 0	20,30	14,52
Cemento	Filler aportación	2,50	2,14

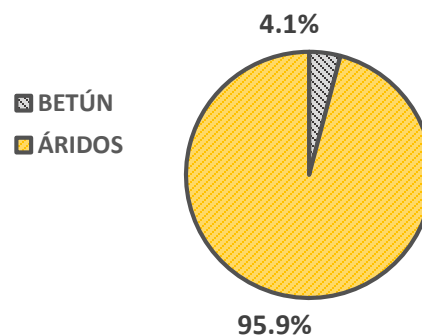
Porcentaje en volumen**Porcentaje en peso****2.3.2. Granulometría de la mezcla**

	Abertura de los tamices (mm)						
	22	16	8	4	2	0,5	0,063
Volumen (% pasa)	100	100	50,20	20,66	14,25	8,13	5,04
Peso (% pasa)	100	100	46,82	16,23	10,55	6,17	3,96

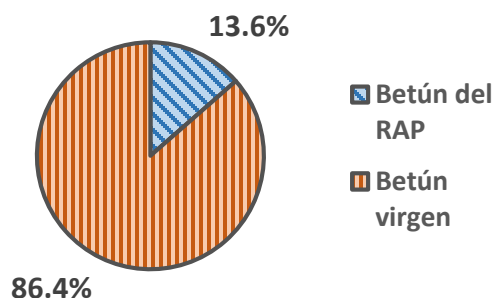


2.3.3. Dosificación de la mezcla

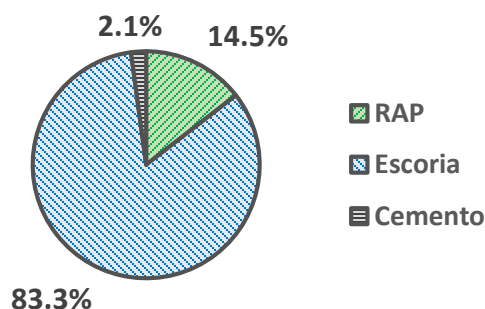
Áridos	95,9 %
Escoria	83,3 %
RAP	14,5 %
Cemento	2,1 %
Betún	4,1 %
Betún del RAP	13,6 %
Betún virgen	86,4 %
Relación filler/betún	0,93 %



Composición del betún:



Composición de los áridos:



2.3.4. Ensayos de dosificación

Durante el proceso de dosificación se han llevado a cabo los distintos ensayos ya mencionados en el apartado 1.3.2. “Ensayos de dosificación de las mezclas”. El resultado de los mismos para la dosificación óptima se recoge a continuación.

Ensayo	Resultado	Normativa
Densidad (gr/cm³)	2,548	-
Huecos en mezcla (UNE 12697-8) (%)	19,99	> 20
Pérdida de partículas (UNE 12697-17) (%)	12,6	< 20 *
Ensayo Cántabro Húmedo (NLT-362) (%)	30,4	< 35 **
Sensibilidad al agua (UNE 12697-12) (% ITRS)	87,7	> 85

* Valores para una categoría de tráfico pesado T00 a T2

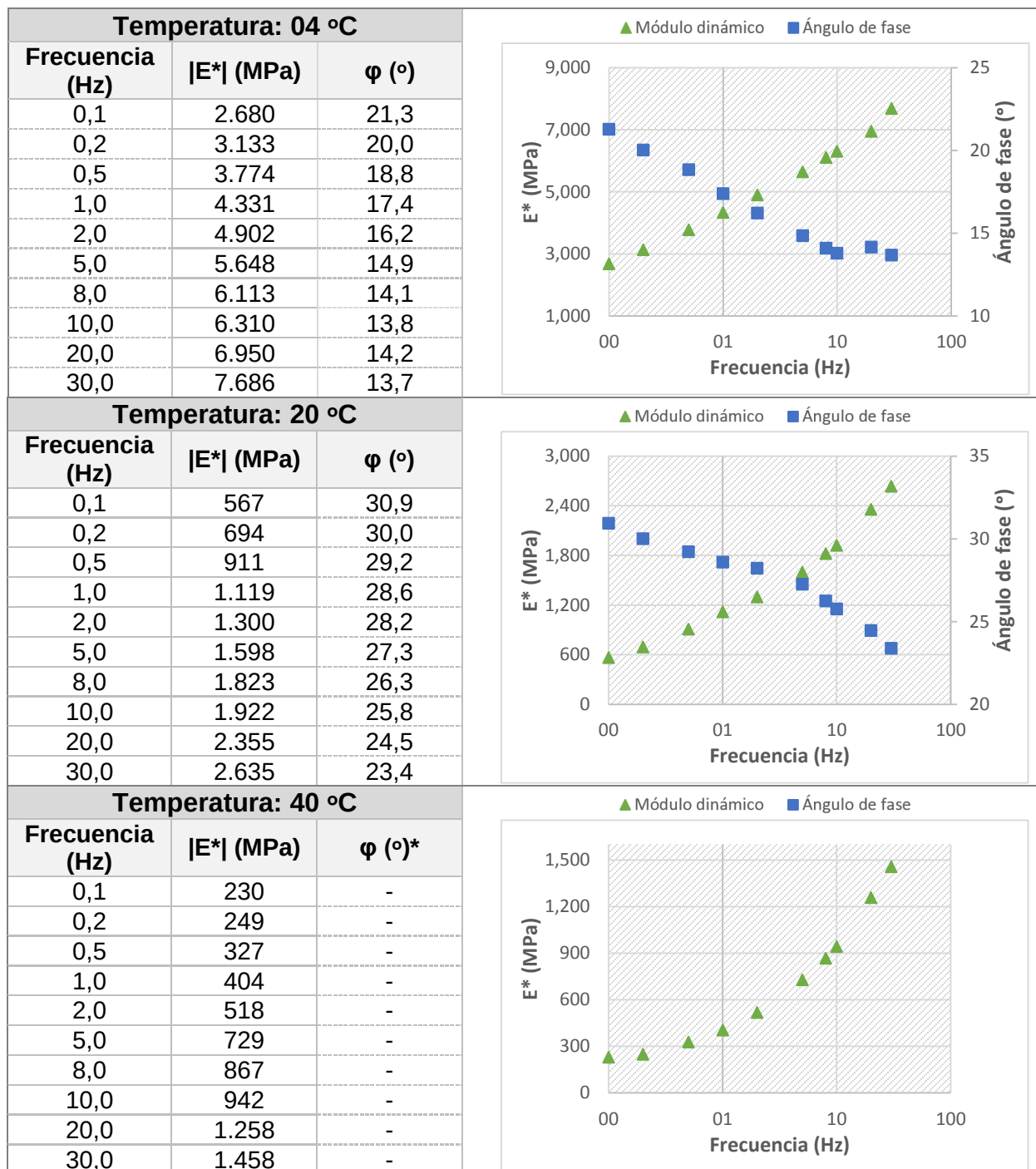
** Valores para una categoría de tráfico pesado T00 a T1

Podemos concluir, a la vista de los resultados, que la mezcla dosificada cumple con las restricciones impuestas por el PG-3 para una mezcla del tipo PA 16 para cualquier categoría de tráfico pesado.

2.4. Ensayos de caracterización mecánico-empírica de las mezclas

2.4.1. Módulo dinámico. Representación de la curva maestra

En este apartado se representa, a partir de los resultados obtenidos en el ensayo UNE-EN 12697-26. Con este ensayo se consigue determinar el módulo dinámico (E^*) y el ángulo de fase (ϕ). En este caso, se han hecho ensayos a tres temperaturas distintas: 4, 20 y 40 °C.



*Los resultados de ángulo de fase fueron registrados de forma errónea

La curva maestra, por su parte, es una representación matemática que trata de ajustar todos los datos de módulo dinámico en una sola ecuación. Esta ecuación, tiene en cuenta tanto la frecuencia de aplicación de la carga como la temperatura de la mezcla. Dicha ecuación es la siguiente.

$$\log(E^*) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma \times \log(f_r)}}$$

$E^* = \text{Módulo dinámico}$

$f_r = \text{Frecuencia de carga a la temperatura de referencia}$

$\delta, \alpha, \beta, \gamma, c = \text{Parámetros de ajuste}$

La frecuencia de carga a la temperatura de referencia es el parámetro que permite introducir el efecto de la temperatura de la mezcla. El objetivo de este parámetro es hallar un valor de frecuencia (frecuencia reducida) tal, que a la temperatura de referencia, el resultado de aplicar la ecuación, es decir, el valor del módulo dinámico, es el mismo que el valor del módulo a la temperatura de análisis deseada.

Existen varias maneras de recoger este efecto de la temperatura, una de ellas es a través de la viscosidad del betún. La ecuación que regula este comportamiento es la siguiente.

$$\log(f_r) = \log(t) - c(\log(\eta) - \log(\eta_{T_r}))$$

La frecuencia reducida se obtiene a través de la viscosidad del betún, que a su vez, depende de la temperatura. La ley que relaciona dicha viscosidad con la temperatura se obtiene a través del siguiente ajuste.

$$\log(\log(\eta)) = A + VTS \times \log(T_R)$$

$\eta = \text{Viscosidad (cP)}$

$T_R = \text{Temperatura a la cual se realizó el ensayo (Rankine)}$

A y $VTS = \text{Parámetros de ajuste}$

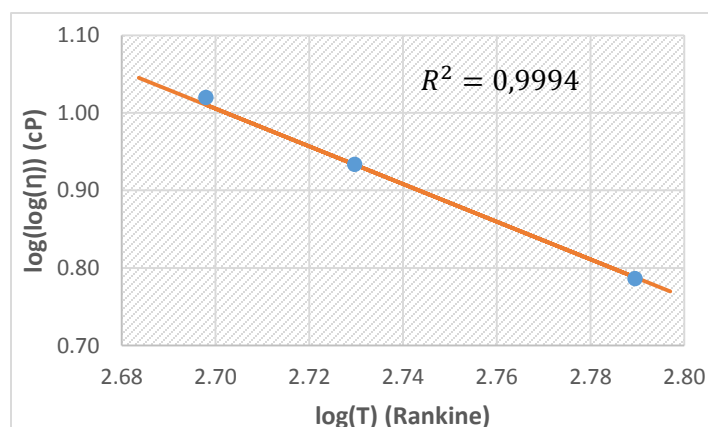
Resultando, a partir de los resultados de los ensayos:

$$\log(\log(\eta)) = 7,561 - 2,428 \times \log(T_R)$$

Parámetros:

$$A = 7,561$$

$$VTS = -2,428$$



Resultando la ecuación que modela la curva maestra:

$$\log(E^*) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma[\log(t) - c(\log(\eta) - \log(\eta_{Tr}))]}}$$

E^* = Módulo dinámico

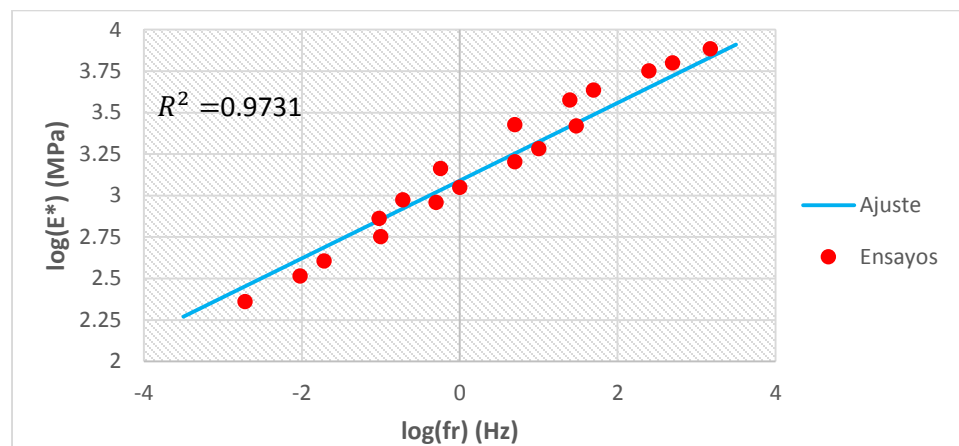
t = Tiempo de carga a la temperatura de referencia

$\delta, \alpha, \beta, \gamma, c$ = Parámetros de ajuste

η = Viscosidad (cP)

η_{Tr} = Viscosidad a la temperatura de referencia (cP)

A partir de los datos obtenidos en el ensayo de módulo dinámico, se realiza un ajuste numérico para determinar los 5 parámetros de ajuste presentes en la ecuación, tomando como temperatura de referencia 20°C. Dicho ajuste se muestra a continuación.



Resultando la ecuación y los parámetros que constituyen la curva maestra como se muestran a continuación:

$$\log(E^*) = 4,579 + \frac{-2,987}{1 + e^{0,008 + 0,330[\log(t) + 1,636(\log(\eta) - \log(\eta_{Tr}))]}}$$

Parámetros:

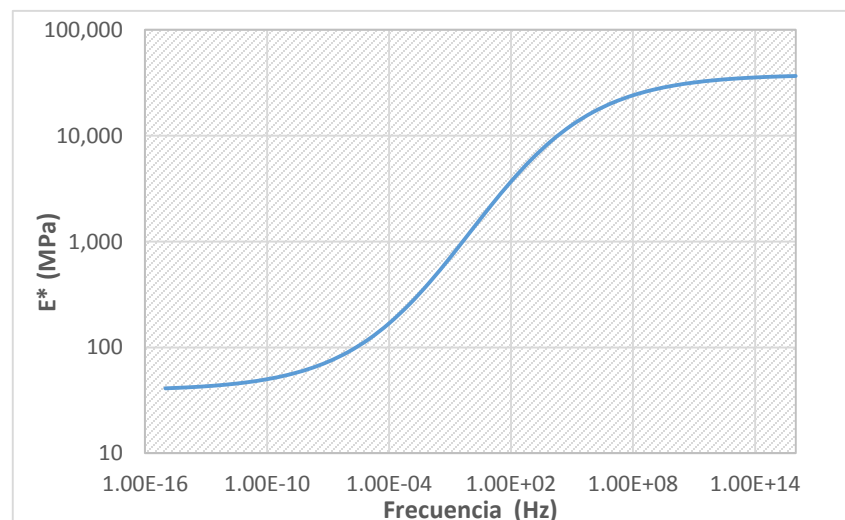
$$\delta = 4,579$$

$$\alpha = -2,987$$

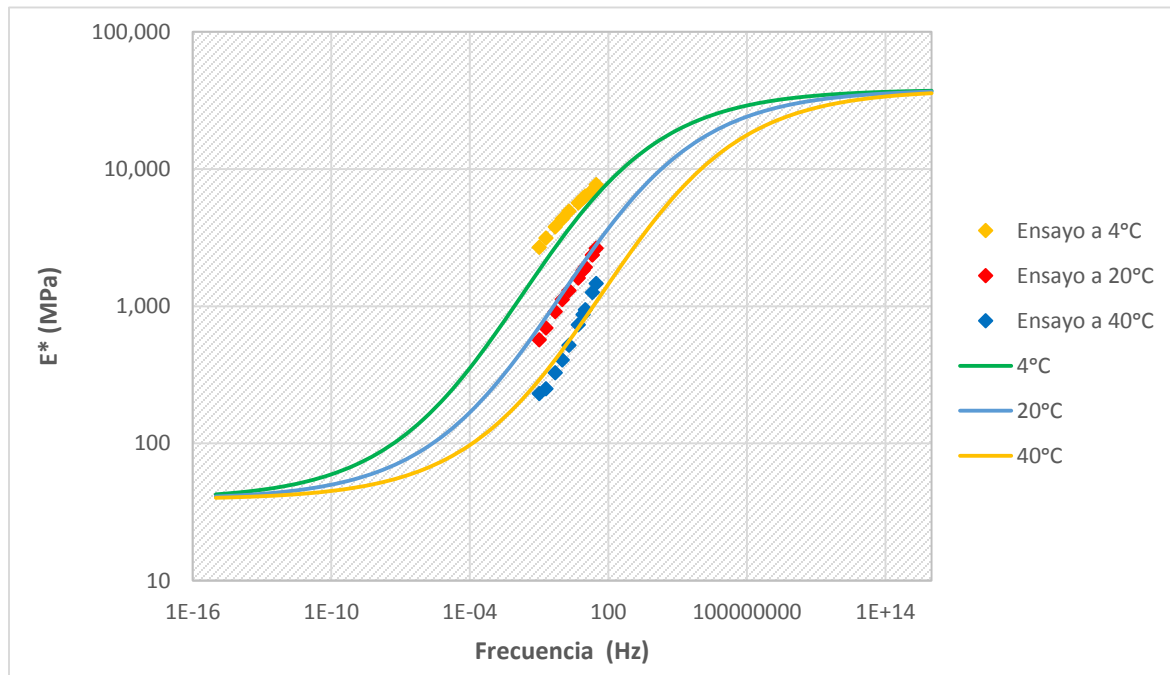
$$\beta = 0,008$$

$$\gamma = 0,330$$

$$c = -1,636$$



A continuación, se muestra la curva maestra representada para las distintas temperaturas de ensayo junto con los valores obtenidos en dichos ensayos.



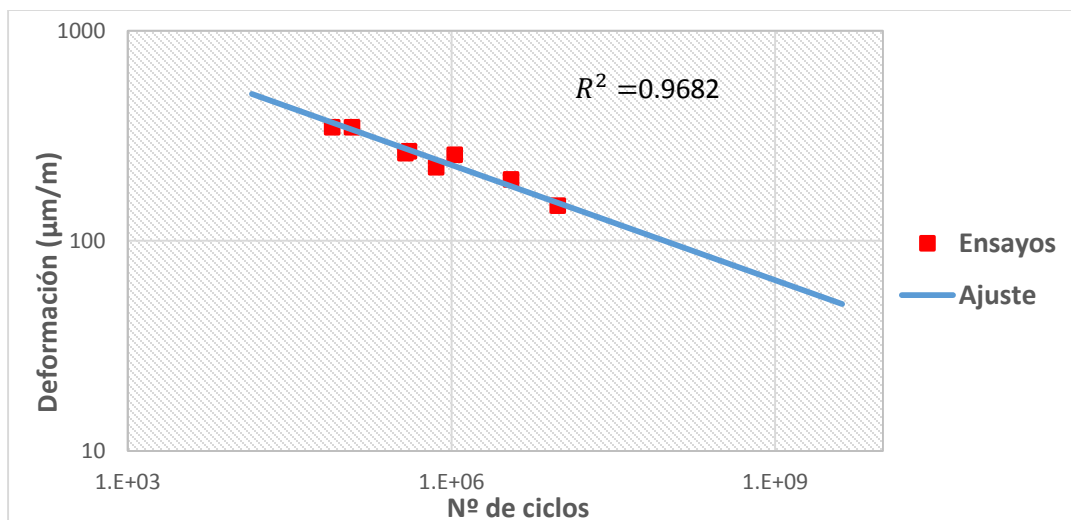
2.4.2. Ensayo de fatiga

Para determinar el comportamiento en fatiga de la mezcla se han realizado un total de 8 ensayos, imponiendo distinta deformación y manteniendo una frecuencia de aplicación constante de 30 Hz y una temperatura de 20°C. Obteniéndose la siguiente ley de fatiga:

$$N = k_1 \times \varepsilon^{k_2}$$

$$\text{Log}(k_1) = 18,914$$

$$K_2 = -5,470$$



CAPÍTULO IV ANÁLISIS DE LA MEZCLA MEDIANTE SOFTWARE

1. SOFTWARE UTILIZADO

1.1. 3D-Move Analysis

El software utilizado para realizar el cálculo de la estructura del firme se conoce con el nombre de “3D-Move Analysis” (University of Nevada, Reno, USA). Este software utiliza cálculo por elementos finitos para calcular la respuesta del pavimento, pudiendo dar respuesta tanto a cargas estáticas como móviles, ofreciendo como resultado las tensiones y deformaciones generadas, tanto normales como tangenciales, en tres dimensiones. Por otro lado, este software permite la caracterizar el comportamiento visco-elástico de los materiales bituminosos.

Encontramos dentro del programa dos modelos utilizados para determinar la vida útil del firme, estos son:

- VESYS Model
- NCHRP1-37A Model

Dentro de estos modelos quedan recogidas las leyes de comportamiento que regulan los distintos mecanismos de fallo. Los modos de fallo disponibles son:

- Fisuración por fatiga
- Deformación permanente en las capas de mezcla bituminosa
- Deformación permanente en las capas granulares
- Deformación permanente en la explanada
- Fisuración descendente
- Pérdida de regularidad superficial

De cara a este trabajo, solamente se va a desarrollar un modo de fallo, concretamente el de fisuración por fatiga. Esto se debe principalmente a que es uno de los modos de fallo más fáciles de correlacionar con el resultado de los ensayos y no depende tanto de los datos de campo.

En este sentido, es importante mencionar que desde un principio se sabe que este modo de fallo no va a ser el modo de fallo que determine la vida útil de la mezcla experimental, ya que, colocada sobre la capa de rodadura, la fisuración por fatiga no es determinante y existen otros mecanismos más críticos sobre este tipo de mezclas. Mecanismos que deberán ser estudiados en fases sucesivas del proyecto pero que no tienen cabida en este trabajo.

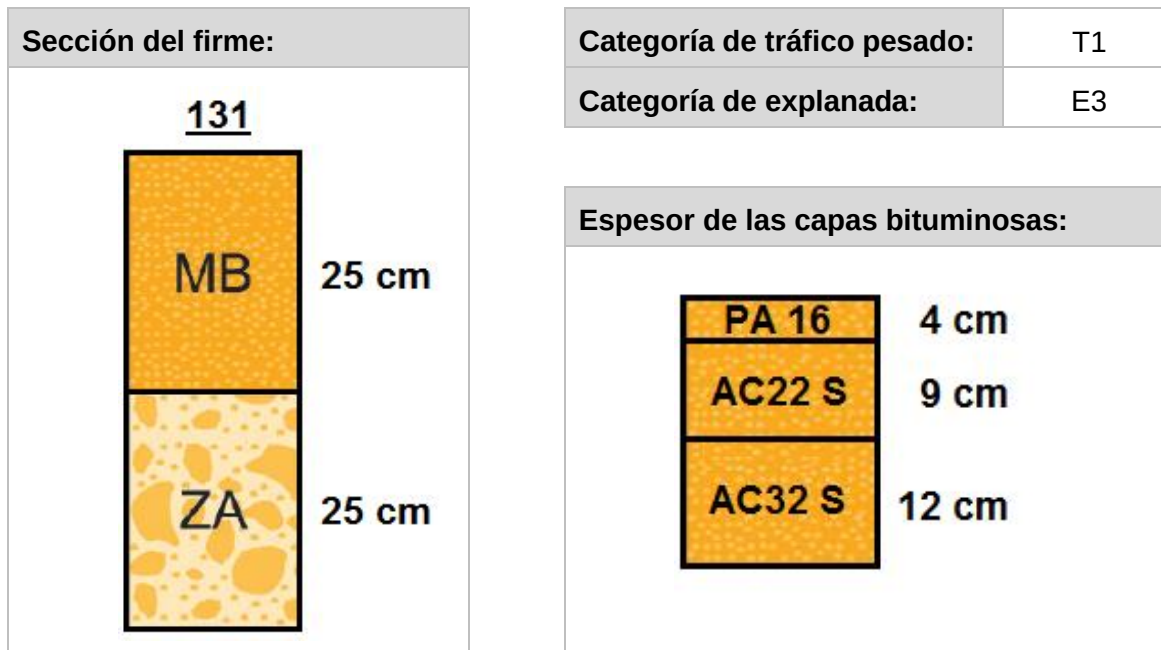
2. CRITERIOS PARA EL ANÁLISIS MEDIANTE SOFTWARE

2.1. Introducción

En este capítulo se trata de determinar cuál serán las condiciones de partida para el posterior análisis del comportamiento de la mezcla experimental mediante software, dentro de un paquete de firme real.

2.2. Paquete de firme seleccionado para el análisis

La sección de firme escogida para realizar este análisis es una de las secciones recogidas en la norma 6.1 IC secciones de firme, de la instrucción de carreteras. Esta sección y las características de la carretera que vamos a tratar son las mostradas a continuación.



Una vez establecida cual va a ser la estructura del firme es necesario determinar las características de cada material que la componen. En este sentido, la mezcla experimental está perfectamente caracterizada, y se han tomado valores representativos para el resto de mezclas que forman el firme de la instrucción para el diseño de firmes de la red de carreteras de Andalucía del año 2007 y del software asociado a la misma, ICAFIR 2006. Esta información, relativa a los distintos materiales se recoge en la siguiente tabla.

Material	Módulo de elasticidad a 20 °C (MPa)	Coefficiente de Poisson
Explanada tipo E3	160	0,35
Zahorra artificial	480	0,35
Mezcla semidensa	6.000	0,33
Mezcla drenante convencional	4.000	0,35

2.3. Criterios de fallo

Dos modos de fallo muy habituales, que serán los estudiados en este trabajo, son el fallo por deformaciones permanentes excesivas en la explanada y el fallo por fisuración debido a esfuerzos de fatiga en las distintas capas bituminosas.

Para poder determinar cuándo se produce alguno de los tipos de fallo antes mencionados, es necesario establecer algún tipo de relación entre la sollicitación que recibe una determinada capa, y el tiempo (o número de sollicitaciones de ese tipo) que es capaz de aguantar sin que se produzca una pérdida de prestaciones significativa (modelo de deterioro).

En la siguiente imagen se pueden ver cuáles son los parámetros críticos de rotura en función de la capa.

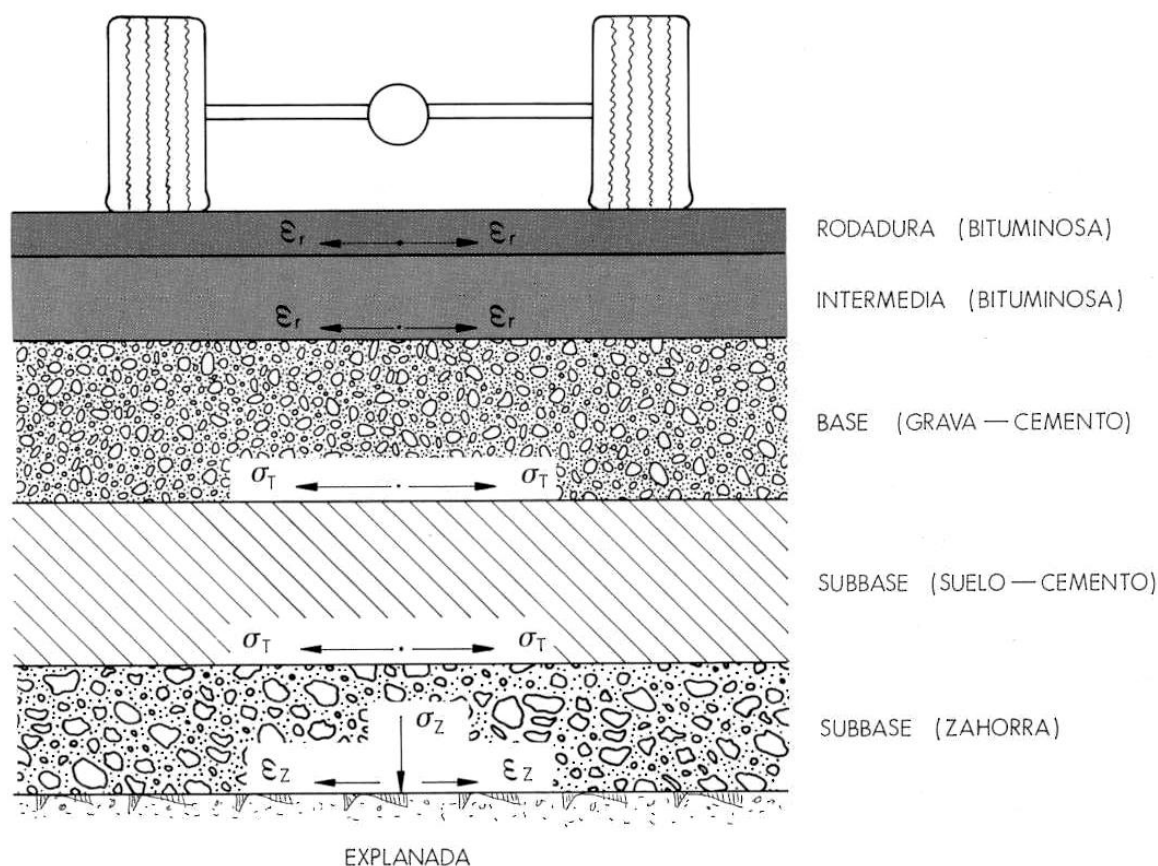


FIGURA 05 – Parámetros críticos de rotura (Fuente: Izquierdo *et al.*, 1990)

2.4. Leyes de comportamiento asociadas a cada material

En este apartado, se muestran las leyes que regulan el deterioro de cada material, que en este caso se corresponden con leyes de fatiga para las capas bituminosas, y una ley de deformaciones permanentes para la explanada. Las leyes de comportamiento utilizadas, salvo para la capa de rodadura de la cual se ha obtenido la ley de forma experimental, han sido tomadas de la norma 6.1 IC para el caso de las capas bituminosas, y de la instrucción para el diseño de firmes de la red de carreteras de Andalucía del año 2007 en el caso de la explanada. A continuación se muestran dichas leyes de comportamiento.

Capa	Modo de fallo	Ley de comportamiento
PA 16 experimental	Fatiga	$N = 10^{18,914} \times \varepsilon (\mu m/m)^{-5,470}$
AC22 S	Fatiga	$\varepsilon (\mu m/m) = 6.925 \times N^{-0,27243}$
AC32S	Fatiga	$\varepsilon (\mu m/m) = 6.925 \times N^{-0,27243}$
Explanada	Deformación permanente	$\varepsilon_z (\mu m/m) = 2,16 \times 10^4 \times N^{-0,28}$

2.5. Cargas aplicadas

El análisis se lleva a cabo bajo la sollicitación de una rueda gemela doble con una presión de contacto de 0,8 MPa, y una huella de rueda circular de radio 11,35 cm. La distancia entre los centros de las ruedas gemelas es de 37,5 cm.

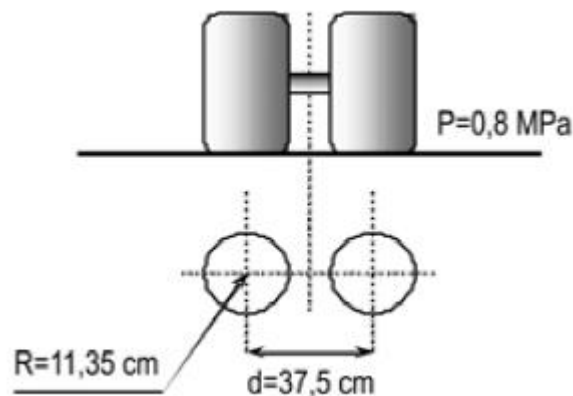


FIGURA 06 – Esquema de las sollicitaciones aplicadas

Por otro lado, debido a que la ley de fatiga ha sido determinada para unas condiciones de temperatura y frecuencia de carga fijas (20°C y 30 Hz), la sollicitación aplicada tendrá esas mismas características en cuanto a frecuencia de aplicación.

2.6. Tráfico de proyecto considerado

La intensidad media diaria de vehículos pesados (IMD_{PA}) para el carril de proyecto para una categoría de tráfico pesado T1 se sitúa en valores que van desde los 800 hasta los 2.000 vehículos pesados. La vida útil del firme se establece en 20 años.

Se adopta 1.500 vehículos pesados como valor para el análisis de la vida útil del firme de diseño. A partir de este dato se calcula el valor del tráfico de proyecto (TP), según lo indica por la instrucción para el diseño de firmes de la red de carreteras de Andalucía, el cual resulta.

$$TP = IMD_{PA} \times CE \times 365 \times F \times \gamma_t$$

$CE = 0,6$ (Coeficiente de equivalencia de los vehículos pesados en número de aplicaciones del eje de 13 tn.)

$F = 24,3$ (Factor de crecimiento del tráfico) (crecimiento al 2% durante 20 años)

$\gamma_t = 1,2$ (Coeficiente de seguridad por mayoración de cargas)

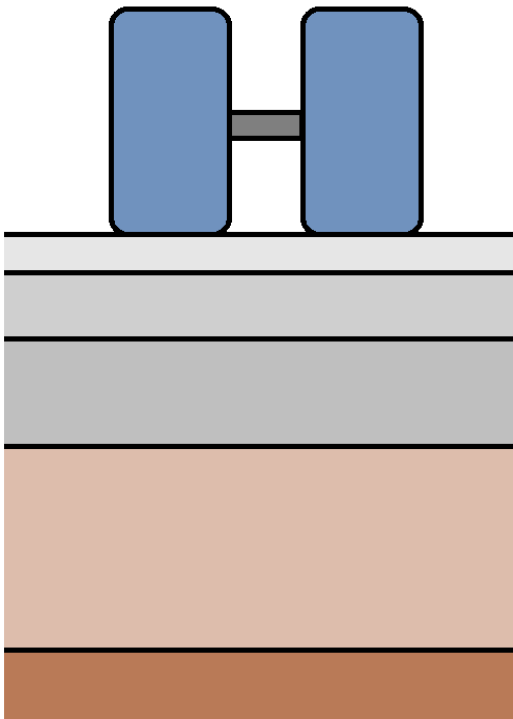
$$TP = 1.500 \times 0,6 \times 365 \times 24,3 \times 1,2 = 9.578.023 \text{ ejes equivalentes}$$

3. RESULTADOS DEL ANÁLISIS MEDIANTE SOFTWARE

3.1. Resultados en términos de tensión y deformación

El resultado obtenido de aplicar el cálculo de tensiones y deformación mediante el software, bajo las condiciones de temperatura y carga antes anteriormente descritas se recoge a continuación en la siguiente tabla.

3.1.1. Resumen de la sección y condiciones de cálculo

Sección del firme	
	
Temperatura:	20 °C
Frecuencia de carga:	30 Hz
Capa:	Módulo :
PA 16:	2.805 MPa
AC22 S:	6.000 MPa
AC32 S:	6.000 MPa
Zahorra artificial:	480 MPa
Explanada:	160 MPa

3.1.2. Sistema de coordenadas empleado

El origen de coordenadas respecto al cual se van a referenciar las tensiones y deformaciones está situado en el punto medio entre las ruedas gemelas del eje, en la superficie de la capa de rodadura. El sentido y la dirección son los indicados en la figura.

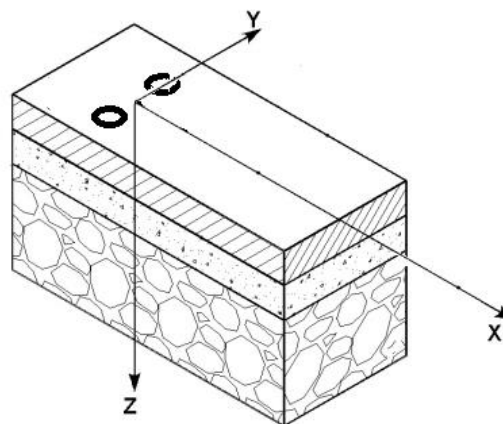
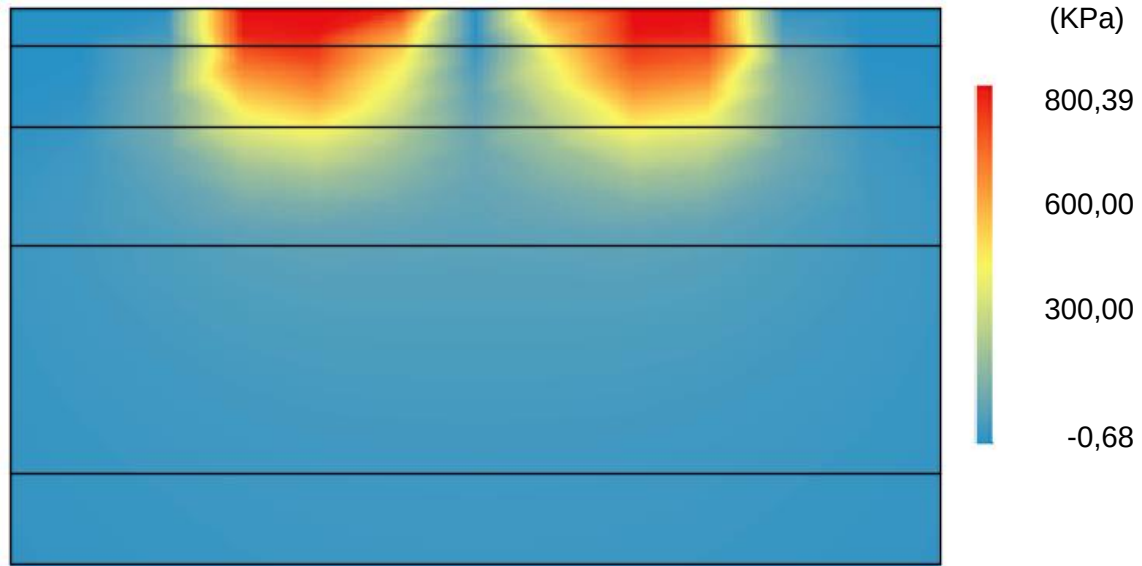


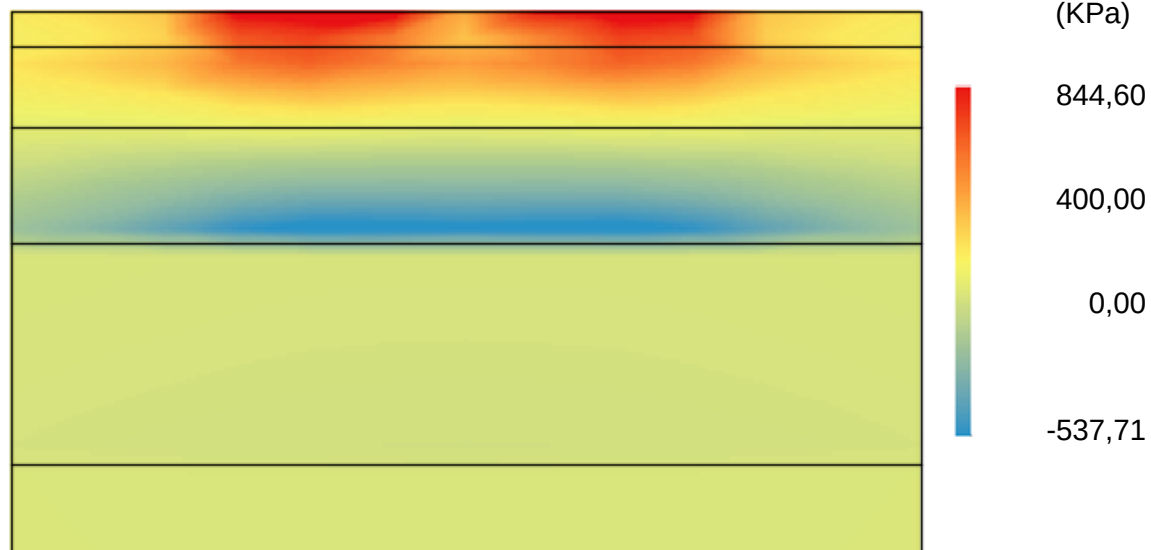
FIGURA 07 – Sistema de coordenadas

3.1.3. Cálculo de tensiones

Tensión vertical (σ_z)

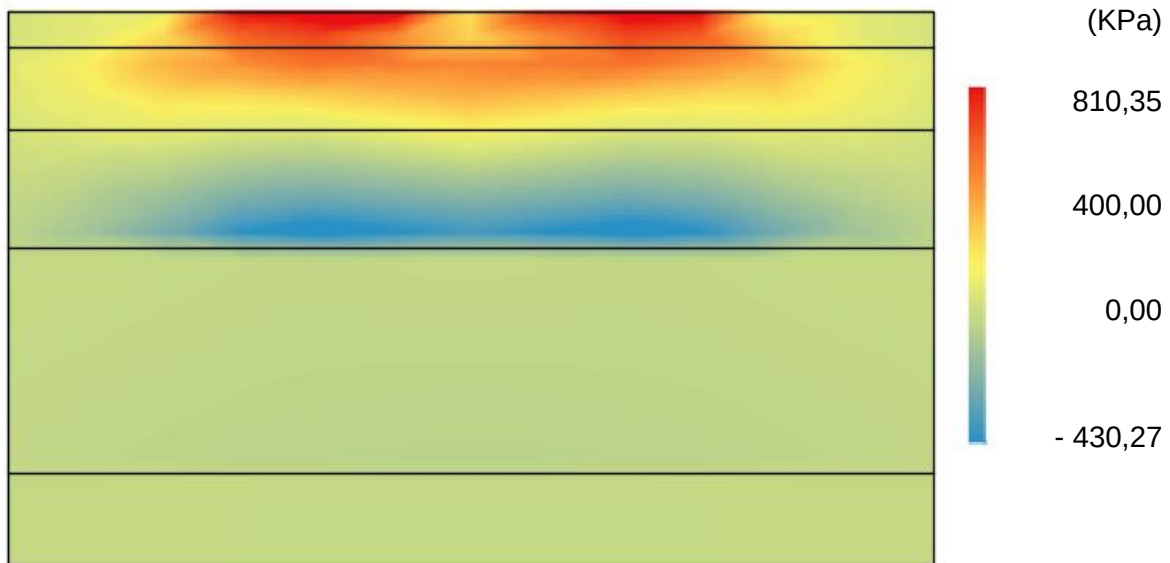
Tensión máxima (mínima): $\sigma_z = 800,39 \text{ KPa} (-0,68 \text{ KPa})$

Posición: $Y = \pm 0,19 \text{ m} (\pm 0,18 \text{ m}) \quad Z = 0,00 \text{ m} (0,00 \text{ m})$

Tensión horizontal (σ_{xx})

Tensión máxima (mínima): $\sigma_{xx} = 844,60 \text{ KPa} (-537,71 \text{ KPa})$

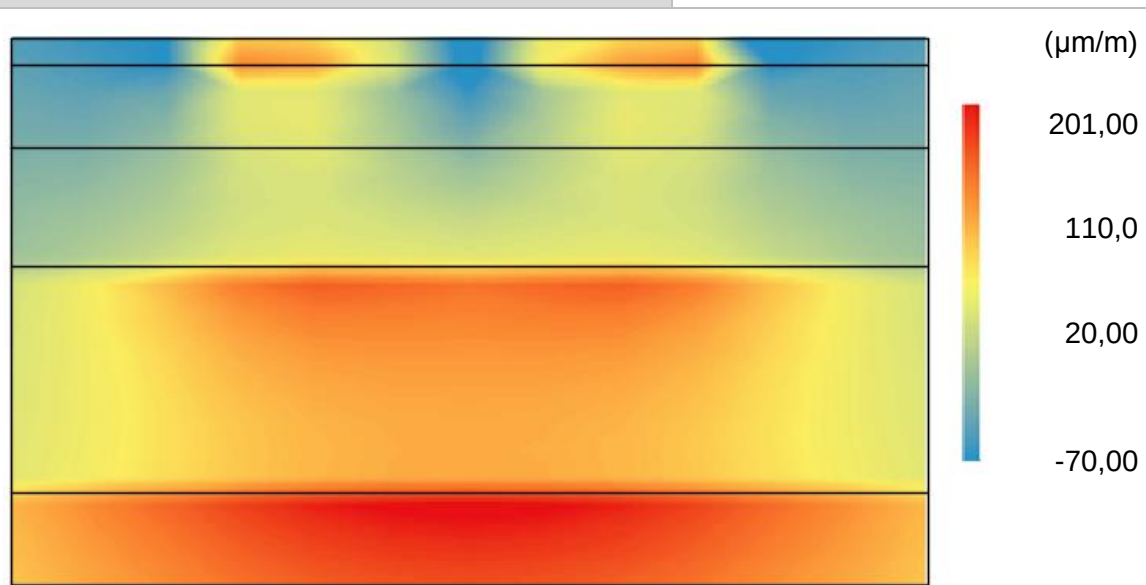
Posición: $Y = \pm 0,19 \text{ m} (\pm 0,18 \text{ m}) \quad Z = 0,00 \text{ m} (-0,25 \text{ m})$

Tensión horizontal (σ_{yy})

Tensión máxima (mínima): $\sigma_{yy} = 810,35 \text{ KPa} (-430,27 \text{ KPa})$

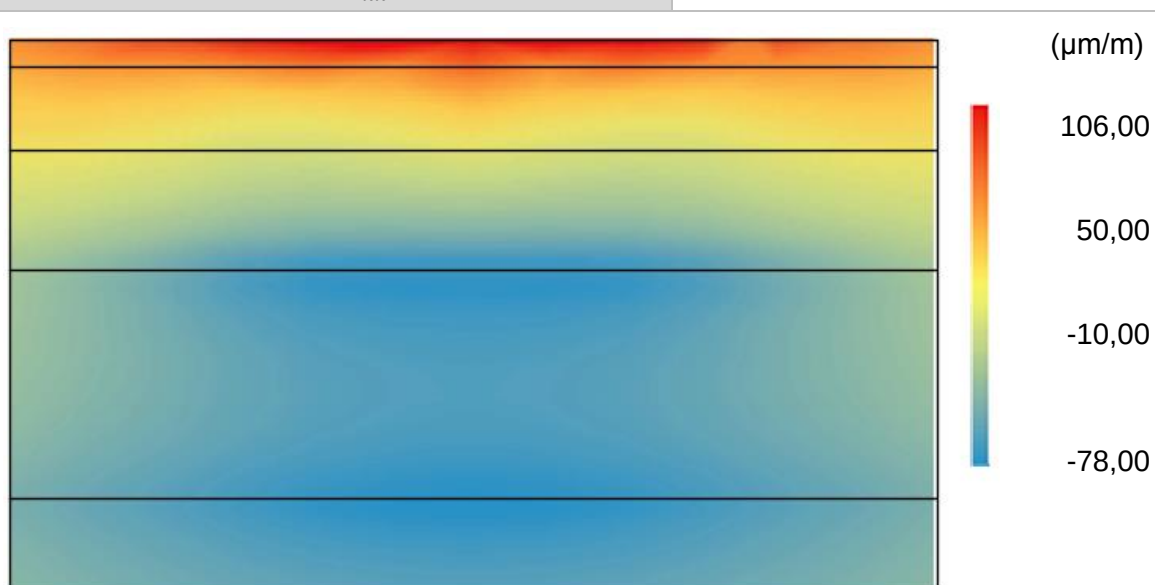
Posición: $Y = \pm 0,19 \text{ m} (\pm 0,18 \text{ m}) \quad Z = 0,00 \text{ m} (-0,25 \text{ m})$

3.1.4. Cálculo de deformaciones

Deformación vertical (ε_z)

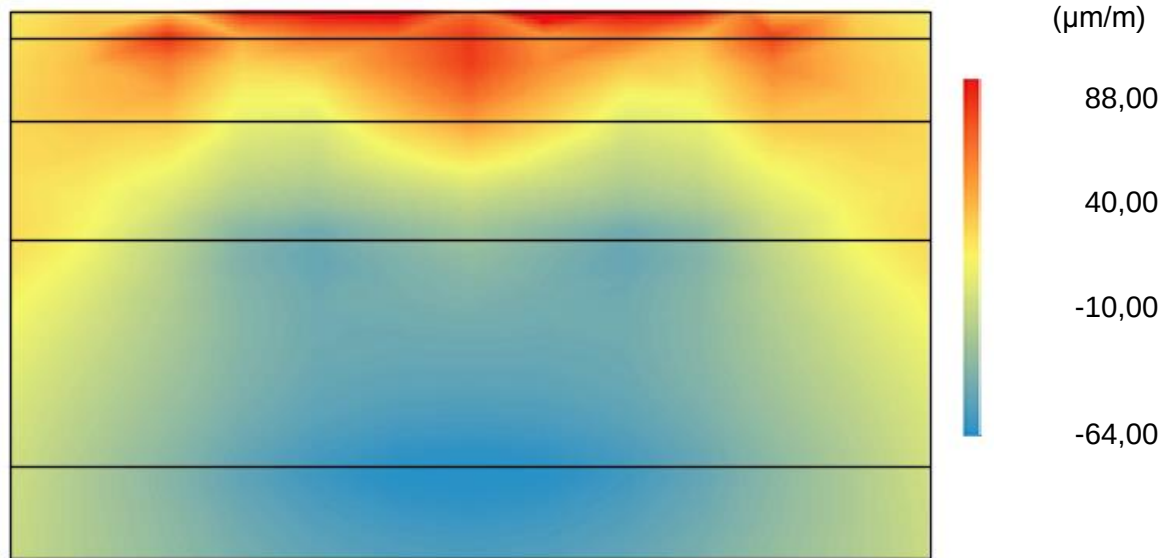
Tensión máxima (mínima): $\varepsilon_z = 201 \mu\text{m}/\text{m} \ (-70 \mu\text{m}/\text{m})$

Posición: $Y = 0,00 \text{ m} \ (0,00 \text{ m}) \quad Z = -0,50 \text{ m} \ (0,00 \text{ m})$

Deformación horizontal (ε_{xx})

Tensión máxima (mínima): $\varepsilon_{xx} = 106 \mu\text{m}/\text{m} \ (-78 \mu\text{m}/\text{m})$

Posición: $Y = 0,00 \text{ m} \ (0,00 \text{ m}) \quad Z = 0,00 \text{ m} \ (-0,50 \text{ m})$

Deformación horizontal (ε_{yy})

Tensión máxima (mínima): $\varepsilon_{yy} = 88 \mu\text{m/m} \ (-64 \mu\text{m/m})$

Posición: $Y = \pm 0,08 \text{ m} \ (0,00 \text{ m}) \quad Z = 0,00 \text{ m} \ (-0,50 \text{ m})$

3.1.5. Deformaciones en los puntos de análisis

En la siguiente tabla se recogen las deformaciones que son de aplicación en las distintas leyes de comportamiento de cada capa del firme, así como el punto donde se producen.

Capa	Deformación	Posición	
Rodadura	$\varepsilon_{yy} \text{ mín} = 30 \mu\text{m/m}$	$Y = \pm 0,19 \text{ m}$	$Z = 0,04 \text{ m}$
Intermedia	$\varepsilon_{xx} \text{ mín} = -16 \mu\text{m/m}$	$Y = \pm 0,19 \text{ m}$	$Z = 0,13 \text{ m}$
Base	$\varepsilon_{xx} \text{ mín} = -80 \mu\text{m/m}$	$Y = \pm 0,0 \text{ m}$	$Z = 0,25 \text{ m}$
Explanada	$\varepsilon_v \text{ máx} = 201 \mu\text{m/m}$	$Y = \pm 0,0 \text{ m}$	$Z = 0,50 \text{ m}$

3.2. Análisis en rotura de la sección

A partir de las tensiones y deformaciones obtenidas en el apartado anterior podemos determinar en qué momento se producirá el agotamiento del firme. Para ello, hacemos uso de las leyes de comportamiento aplicadas a cada material, calculando el número de ciclos de carga que agota cada una de las capas.

Capa de rodadura (PA 16 experimental)

Modo de fallo: Fatiga

Solicitación: Deformación de tracción máxima en la dirección horizontal

Ley de comportamiento: $N = 10^{18,914} \times \varepsilon (\mu m/m)^{-5,470}$

En este caso no se produce la rotura debido a que toda la capa permanece comprimida y por tanto no se produce ninguna deformación de tracción en la misma

Capa de intermedia (AC22 S)

Modo de fallo: Fatiga

Solicitación: Deformación de tracción máxima en la dirección horizontal

Ley de comportamiento: $\varepsilon (\mu m/m) = 6.925 \times N^{-0,27243}$

En este caso no se estudia el efecto a fatiga debido a que la capa de base, de idénticas características, está sometida a una mayor deformación de tracción, y por tanto, será la capa más crítica de las dos.

Capa de base (AC32 S)

Modo de fallo: Fatiga

Solicitación: Deformación de tracción máxima en la dirección horizontal

Ley de comportamiento: $\varepsilon (\mu m/m) = 6.925 \times N^{-0,27243}$

Deformación máxima: $\varepsilon = -80 \mu m/m$

Nº ciclos hasta rotura: $N \approx 12,9 \times 10^6 \text{ ciclos}$

Sobre esta capa actúan tensiones de tracción que generan una deformación apreciable en la cara inferior de la misma. Aplicando la ley de fatiga del material se obtiene un valor de 12,9 millones de ciclos de vida útil para esta capa.

Explanada

Modo de fallo: Deformación permanente

Solicitud: Deformación vertical máxima en la cara superior

Ley de comportamiento: $\varepsilon_z(\mu m/m) = 2,16 \times 10^4 \times N^{-0,28}$

Deformación máxima: $\varepsilon_z = 201 \mu m/m$

Nº ciclos hasta rotura: $N \approx 17,9 \times 10^6 \text{ ciclos}$

En este caso, la deformación vertical máxima producida en la cara superior de la explanada determina que la vida útil de esta capa se sitúe en 17,9 millones de ciclos, superior a la vida útil de capa base.

3.3. Vida útil de la sección de firme

Con un resultado de 12,9 millones de ejes equivalentes se obtiene una vida útil esperada del firme de 25 años, superior a la vida útil habitual estimada para este tipo de firmes (20 años)

CAPÍTULO V CONCLUSIONES

1. CONCLUSIONES

1.1. Conclusiones

La primera conclusión que extraemos de este estudio es que tanto la escoria como el material de fresado son dos materiales aptos para su uso de mezclas drenantes. En base a las propiedades analizadas con el software, y a falta de continuar analizando el pavimento, la mezcla experimental ha mostrado un buen rendimiento obteniendo a nivel de laboratorio una vida útil de en torno a 25 años, muy superior a la habitual en este tipo de mezclas.

A nivel de mezcla, se ha demostrado la viabilidad técnica de una mezcla drenante cuyo cuerpo mineral este compuesto en prácticamente un 100% de material reciclado. Este hecho es un aspecto fundamental ya que se consigue cumplir con el principal objetivo planteado al inicio del proyecto.

En esta misma línea, para el caso del material de fresado, se ha conseguido dosificar una mezcla compuesta en un 20% del volumen por este material, tasa propia de una mezcla tipo hormigón bituminoso (AC), pero considerando que se trata de una mezcla drenante se puede hablar de una tasa bastante elevada.

Por otro lado, se ha logrado cumplir todos los requisitos exigidos a nivel de laboratorio para este tipo de mezclas por el PG-3, además, ha cumplido los parámetros mínimos bajo las condiciones de mayor exigencia, es decir, bajo las condiciones de mayor tráfico pesado y para cualquier zona climática del territorio español.

2. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

2.1. Futuras líneas de investigación

Como ya se comentó en la introducción, este trabajo compone una parte de las actividades que forman el proyecto DURABROADS. Dentro de las actividades relacionadas con el contenido de este trabajo, y que serán desarrolladas a continuación del mismo, podemos destacar las siguientes:

- Continuar con la caracterización de la mezcla drenante, analizando los distintos modos de fallo que puedan presentarse en este tipo de mezclas de cara a una simulación más completa de la sección de firme mediante software.
- Dosificación de una mezcla discontinua (BBTM) manteniendo los mismos objetivos del presente trabajo, es decir, con un esqueleto mineral compuesto en un 100% por materiales reciclados (escoria y fresado), intentando maximizar la cantidad de fresado.
- Fabricar y determinar el comportamiento de las mezclas estudiadas (Drenante y discontinua) sustituyendo el betún utilizado por un betún mejorado mediante técnicas de nanotecnología.
- Analizar el comportamiento de dichas mezclas mediante la utilización de software específico ahondando en las posibilidades ofertadas por el mismo, determinando el efecto del tiempo sobre la mezcla (envejecimiento) y la influencia de la variación climática.

CAPÍTULO VI REFERENCIAS

Ministerio de Fomento. PG-3, Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes. España.

Ministerio de Fomento. PG-4, Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Conservación de Carreteras

European Asphalt Pavement Association (EAPA) (<http://www.eapa.org>)

Federal Highway Administration (FHWA) (<https://www.fhwa.dot.gov>)

Avilés Lorenzo, J. (2002). Estudio de la tenacidad de los microaglomerados reciclados en caliente mediante el ensayo BTB. Efecto del tipo y contenido de betún. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.

Nuria Querol Sola, Jorge Ortiz Ripoll y Pilar Mañas Pascual. Más de cien razones. ASEFMA, III Jornada técnica. Madrid, 24 de Enero 2008. Mezclas bituminosas con muy altas tasas de reciclado. Rehabilitación de la carretera A-140 entre Tamarite y Binéfar (HU) con mezcla bituminosa en caliente con una tasa de reciclado del 60%.

Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice. Publication No. FHWA-HRT-11-021 April 2011

ASTEC (<http://es.astecinc.com/products/drying-mixing/double-rap-dryer-mixer.html>)

Reciclado en planta de mezclas bituminosas en caliente. Félix Edmundo Pérez Jiménez

EAPA. Long-Life Asphalt Pavements. Technical version. June 2007.

Asphalt Pavement Alliance (APA). Perpetual asphalt pavements, a synthesis.

Brown, E. R., and S. A. Cross. A National Study of Rutting in Hot Mix Asphalt (HMA) Pavements. Report No. 92-5, National Center for Asphalt Technology, Auburn University, Ala., 1992. (<http://www.ncat.us/files/reports/1992/rep92-05.pdf>)

ASPHALTROADS. (<http://www.asphaltroads.org/perpetual-pavement/award-winners/>)

Manual de carreteras. Tomo II. Luis bañón Blázquez, José F. Beviá García

Bagampadde, Al-Abdul Wahhab, & Aiban, 1999. Optimization of Steel Slag Aggregates for Bituminous Mixes in Saudi Arabia. Journal of Materials in Civil Engineering., vol 11., issue 1, 30-35.

Pasetto & Baldo, (2010). Experimental evaluation of high performance base course and road base asphalt concrete with electric arc furnace steel slags. Journal of Hazardous Materials, 938-948.

Pérez Coca, M. (2011). Diseño y caracterización mecánica de mezclas discontinuas recicladas para capas de rodadura. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.

United States Geological Survey (USGS), 2013

Centro de estudios y experimentación de obras públicas (CEDEX). (2011). Ficha técnica. Escorias de acería de horno de arco eléctrico. Ministerio de Fomento. Ministerio de medio ambiente y medio rural y marino.

Centro de estudios y experimentación de obras públicas (CEDEX). (2011). Reciclado de pavimentos asfálticos. Ministerio de Fomento.

European Tyre Recycling Association. <http://www.etra-eu.org/>

European Tyre & Rubber Industry: Statistics. ETRMA. Edition 2012

Ministerio de Medio Ambiente. Plan Nacional Integrado De Residuos (PNIR) (2007-2015)

Luis Medina Rodríguez, Ignacio Pérez Pérez y Ramón Crespo del Río. Comprobación estructural de las secciones de firme de la instrucción de carreteras 6.1 y 6.2 i.c.