



Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza



PROYECTO FIN DE CARRERA

INFLUENCIA DE LA NATURALEZA DEL FÍLLER DE APORTACIÓN EN LA ADHESIVIDAD ÁRIDO-LIGANTE PARA MEZCLAS BITUMINOSAS DISCONTÍNUAS

AUTOR

Miguel Ángel Moreno Pérez

DIRECTORES

Icíar Alfaro Ruiz

José Miguel Fuertes Arnal

ESPECIALIDAD

Mecánica

CONVOCATORIA

Septiembre 2011

Agradecimientos:

La realización de este proyecto no habría sido posible sin la ayuda inestimable de ciertas personas, cuyo esfuerzo ha sido muy importante antes, durante y después de realizar dicho estudio.

En primer lugar, quiero mostrar todos mis agradecimientos a la empresa Mariano López Navarro, por brindarme la oportunidad de llevar a cabo este proyecto. En especial a José Miguel y Alberto, que son las personas que me han ayudado a realizarlo, dentro de su disponibilidad en su horario de trabajo.

Quiero agradecer a mi directora de proyecto, Icíar Alfaro Ruiz, por haberme dado la oportunidad de desarrollar este proyecto, gracias a su participación en la Cátedra que la Universidad de Zaragoza comparte con el grupo constructor Mariano López Navarro. Agradecerle su atención, motivación y apoyo durante la realización del proyecto.

No me quiero olvidar de María Ángeles Pérez, por su esfuerzo inicial para contactar con la empresa, ya que sin su labor, seguramente no hubiera podido realizar este proyecto.

Por último, agradecer el apoyo tanto de amigos como de mi familia, en especial a mis padres y mi hermano, que siempre son el mejor apoyo que tengo día a día.

ÍNDICE GENERAL:

CAPÍTULO 1: Introducción

1.1 Motivación del proyecto	9
1.2 Objetivos	10
1.3 Contenido del proyecto	11

CAPÍTULO 2: Firmes

2.1 Introducción	13
2.2 Funciones del firme.....	14
2.3 Características funcionales del firme	15
2.3.1 Características superficiales.....	15
2.3.2 Características estructurales.....	18
2.4 Tipos de firmes	20
2.4.1 Firmes flexibles.....	20
2.4.2 Firmes rígidos	22
2.4.3 Firmes mixtos	22
2.5 Constitución del firme.....	23
2.5.1 Capa de rodadura	24
2.5.2 Capa intermedia o binder	29
2.5.3 Capa de base	29
2.5.4 Capa sub-base	31

2.5.5 Explanada mejorada.....	31
2.5.6 Capas especiales.....	31
2.6 Materiales empleados en la construcción de firmes	32

CAPÍTULO 3: Mezclas asfálticas en la construcción de firmes

3.1 Definición	35
3.2 Componentes de las mezclas asfálticas.....	36
3.2.1 Agregados pétreos.....	36
3.2.1.1 Definición	36
3.2.1.2 Clasificación de los áridos	37
3.2.1.2.1 Criterio de naturaleza mineral.....	37
3.2.1.2.2 Criterio de procedencia	39
3.2.1.2.3 Criterio de adhesividad árido-ligante.....	40
3.2.1.2.4 Criterio de granulometría.....	41
3.2.1.3 Propiedades y caracterización de los áridos.....	41
3.2.1.3.1 Propiedades de conjunto: granulometría.....	43
3.2.1.3.2 Forma y tamaño de los áridos. Angulosidad. Tamaño máximo.	44
3.2.1.3.3 Resistencia mecánica al desgaste.....	46
3.2.1.3.4 Resistencia al pulido	46
3.2.1.3.5 Durabilidad	47
3.2.1.3.6 Afinidad entre árido y betún	47
3.2.1.3.7 Propiedades de las partículas finas	48

3.2.2 Ligantes.....	50
3.2.2.1 Definición y tipos.....	50
3.2.2.1.1 Ligantes modificados	51
3.2.2.2 Procedencia y obtención	53
3.2.2.3 Propiedades.....	55
3.3 Clasificación de las mezclas asfálticas	57
3.3.1 Por el árido empleado	58
3.3.2 Por la temperatura de puesta en obra	58
3.3.3 Por el porcentaje de huecos en mezcla	59
3.3.4 Por el tamaño máximo de los áridos	60
3.3.5 Por la granulometría de los áridos	61
3.3.6 Por la estructura del árido	61

CAPÍTULO 4: Mezclas bituminosas en caliente discontinúas para capas de rodadura

4.1 Definición	63
4.2 Materiales y criterios de diseño	64
4.2.1 Ligante hidrocarbonado	64
4.2.2 Áridos.....	66
4.2.2.1 Características generales.....	66
4.2.2.2 Árido grueso.....	66
4.2.2.3 Árido fino.....	68
4.2.2.4 Polvo mineral.....	69

4.3 Tipo y composición de la mezcla.....	70
4.4 Parámetros de análisis.....	72
4.5 Ventajas de uso respecto a las mezclas tradicionales	74

CAPÍTULO5: Ensayos experimentales. Resultados y conclusiones.

5.1 Metodología	75
5.1.1 Selección granulométrica y fórmula de trabajo	75
5.1.2 Elección tipo de ligante.....	80
5.1.3 Elección porcentaje de ligante	80
5.2 Realización de ensayos	81
5.2.1 Preparación y realización de las probetas	81
5.2.2 Densidad y análisis de porcentaje de huecos en la mezcla	92
5.2.2.1 Cálculo de densidad relativa	93
5.2.2.2 Determinación de los huecos	95
5.2.3 Ensayo Cántabro	98
5.2.3.1 Objeto y campo de aplicación.....	98
5.2.3.2 Aparatos y material necesarios	99
5.2.3.3 Procedimiento del ensayo Cántabro.....	100
5.2.3.4 Cálculos y resultados obtenidos.....	105

5.3 Resultados obtenidos	106
5.3.1 Resultados en serie de probetas filler silicio.....	107
5.3.2 Resultados en serie de probetas filler calizo.....	110
5.3.3 Resultados en serie de probetas filler cemento.....	113
5.3.4 Resultados en serie de probetas filler incineración lodos depuradora.....	116
5.3.5 Fotografías de las probetas tras su estudio.....	119
5.4 Conclusiones	121
5.5 Perspectivas futuras	126
 Bibliografía	 127

Capítulo 1: Introducción

1.1 Motivación del proyecto

Los requerimientos de seguridad al tránsito exigidos hoy en día a las superficies de rodamiento, han llevado a desarrollar materiales con características diferentes a los convencionales. La Mezcla Asfáltica Drenante (MAD) o Mezcla Asfáltica Porosa (MAP), es un material que ha sido desarrollado en esta línea de pensamiento. Este tipo de mezclas se caracterizan por tener un elevado porcentaje de huecos interconectados entre sí (16 a 25% o más, dependiendo del uso, habitualmente en capas de rodadura). Estos huecos permiten el paso del agua a través de la misma, favoreciendo su eliminación en la superficie del camino, y presentando una alta macrotextura y microtextura, ésta última como consecuencia de la calidad de los áridos usados.

El diseño de estas mezclas presenta un compromiso entre su porosidad y su resistencia al desgaste. El equilibrio de estas propiedades trae como consecuencia una mezcla óptima, ya que al ser éstas contrapuestas, el aumento de la porosidad suele inducir una disminución de la resistencia al desgaste. Esta última es necesaria para que la capa no se desintegre y pueda responder satisfactoriamente a las solicitudes del tránsito.

En el presente proyecto se intenta participar de forma activa en la investigación de este tipo de mezclas para su posterior utilización en elementos de obras públicas ,como son las carreteras, mediante una serie de ensayos en el Laboratorio I+D del grupo constructor Mariano López Navarro, situado en la localidad de Bárboles (Zaragoza).

1.2 Objetivos

Las mezclas anteriormente mencionadas se conocen como mezclas bituminosas discontinuas de granulometría abierta. Se componen básicamente de áridos, ligante bituminoso y un filler de aportación, que es un polvo mineral que se añade para darle más resistencia a las mezclas.

Este proyecto se centra en el uso de este tipo de mezclas asfálticas en la capa de rodadura drenante de la carretera. Por ello se va a analizar la pérdida de desgaste en dichas capas, pues son las expuestas directamente a las solicitaciones del tráfico, sin perder de vista el porcentaje de huecos que dicta la norma, para que cumpla su función de drenaje del agua. Se analizarán ambos parámetros mediante la simulación de estas capas en forma de probetas de asfalto, las cuales se fabrican, compactan y ensayan en el laboratorio, de acuerdo a la normativa vigente expuesta en el pliego de prescripciones técnicas del PG-3.

Por todo ello, el objetivo de este proyecto es ver cómo influye la naturaleza química de ese filler de aportación en este tipo de mezclas, a través de series de probetas en las que se analizará la pérdida de desgaste mediante el ensayo Cántabro. Finalmente se concluirá con qué filler confiere mejores propiedades de resistencia al desgaste a este tipo de mezclas asfálticas.

Destacar que la dosificación o composición de todas las probetas será siempre la misma, en cuanto a porcentaje de ligante, áridos y filler. En las series de probetas sólo variará el tipo de filler. Concretamente, se analizarán seis probetas por cada tipo de filler empleado, siendo éste de cuatro tipos : filler silicio, filler calizo, filler cemento y filler procedente de la incineración de lodos de depuradora. Esto hace un total de 24 probetas, en las que se calcularán los parámetros citados anteriormente, cumpliendo siempre con la normativa vigente (PG-3).

1.3 Contenido del proyecto

El presente proyecto, además de este primer capítulo a modo de introducción, se compone de otros cuatro más:

Como el proyecto se centra en una zona concreta del firme de las carreteras, el *capítulo 2* da una visión global de lo que es el firme, su composición, tipos y propiedades que debe tener. En este capítulo, se hará especial hincapié en las capas de rodadura drenantes.

En el *capítulo 3*, relacionado con el segundo, se habla de todo lo relacionado con las mezclas asfálticas en la construcción de firmes. Aquí se da una clasificación de las mismas, introduciendo los primeros conceptos sobre mezclas bituminosas discontinuas, tema en el que se dará una visión más amplia en el siguiente capítulo.

Tras haber introducido el concepto de mezcla bituminosa anteriormente, el *capítulo 4* se centra en las mezclas bituminosas discontinuas para capas de rodadura, con lo que se ira fijando más el objetivo del análisis del presente estudio. Aquí se hablará de propiedades, tipos y qué parámetros hay que tener en cuenta a la hora de diseñar este tipo de mezclas.

El *capítulo 5*, recoge los trabajos realizados en el laboratorio: fórmula de trabajo a emplear, dosificación de las probetas, fabricación de probetas mediante el ensayo Marshall y posterior ensayo de las mismas, mediante el ensayo Cántabro. En este apartado, se hace referencia a las normas empleadas, e incluye diversas graficas y tablas en las que se recogen los resultados para cada serie de probetas. Al final de este mismo capítulo, se hará un análisis sobre las conclusiones obtenidas y posibles perspectivas futuras.

Capítulo 2: Firmes

2.1 Introducción

Un firme de carretera está constituido por un conjunto de capas horizontales cuya función es transmitir a la explanada las solicitaciones del tráfico suficientemente amortiguadas para que puedan ser soportadas por ésta. Al mismo tiempo ha de proporcionar una superficie de rodadura cómoda y segura para la circulación de los vehículos.

Aparte de poseer unas notables características resistentes, el firme debe ser capaz de aportar otra serie de propiedades que garanticen la seguridad y comodidad de los usuarios de forma duradera. En este sentido, la terminación superficial del firme, materializada en la capa de rodadura, juega un papel fundamental.

La actual concepción del firme como estructura multicapa, unida al desarrollo de nuevos materiales, deriva en la generación de infinidad de secciones diseñadas específicamente para determinadas situaciones de carga. No obstante, puede hacerse una síntesis de todas ellas en dos grandes grupos atendiendo a la forma de resistir los esfuerzos, así como por los materiales y capas que las componen: éstos son los *firmes flexibles*, formados por capas bituminosas y granulares, y los *firmes rígidos*, compuestos por pavimentos de hormigón. Otros subgrupos especialmente importantes son los firmes *semirrígidos*, los *drenantes* y los *mixtos*.

2.2 Funciones del firme

La aparición del firme como elemento básico de una carretera se justifica plenamente con la evolución del transporte a lo largo de la historia, especialmente en este último siglo, en el que los vehículos están dotados de mejores prestaciones.

El incremento en la velocidad de circulación, sumado a la cada vez mayor proliferación de vehículos pesados deja obsoletas a las explanadas, incapaces de resistir la acción directa de fuertes cargas verticales y tangenciales, muy susceptibles a los agentes meteorológicos. Este hecho ha obligado a idear nuevos materiales acordes con la situación, diseñados para que soporten las solicitaciones generadas por el tráfico.

Todo ello lleva a concluir que las principales funciones de los firmes que actualmente se emplean en la construcción de carreteras son las siguientes:

1.- **Resistir las solicitaciones del tráfico previsto**, así como servir de colchón de amortiguamiento de las cargas verticales para las capas inferiores, de forma que a la explanada llegue una pequeña parte de aquellas, compatible con su capacidad portante.

2.- **Proporcionar una superficie de rodadura segura y cómoda**, cuyas características se mantengan uniformes durante el periodo de funcionamiento de la vía, produciéndose a lo largo de éstas deformaciones admisibles y deterioros que puedan ser objeto de actuaciones eventuales de conservación y mantenimiento por otra parte lógicas en cualquier tipo de infraestructura.

3.- **Resguardar la explanada de la intemperie**, y especialmente de las precipitaciones y el agua en cualquier de sus formas, ya que en determinados suelos produce una merma considerable en sus características resistentes, pudiendo además provocar lavados de parte del material e incluso fenómenos de deslizamiento.

Como conclusión, puede decirse que la función final de un firme no es otra que la de soportar la acción de los vehículos que circulan sobre el, proporcionando en todo instante una superficie de rodadura cómoda, segura y duradera. La calidad del firme es un aspecto importante para que estas funciones se lleven a cabo de forma efectiva. Su infraestructura (obras de tierra y drenaje) también debe ser apropiada.

2.3 Características funcionales del firme

Las características o cualidades funcionales del firme residen fundamentalmente en su superficie. De su acabado y de los materiales que se hayan empleado en su construcción dependen aspectos tan interesantes y preocupantes para los usuarios, como:

- la adherencia del neumático al pavimento,
- el ruido en el exterior y en el interior del vehículo,
- las proyecciones de agua en tiempo de lluvia,
- la resistencia a la rodadura (consumo de carburante),
- las propiedades ópticas,
- el desgaste de los neumáticos, y
- el envejecimiento de los vehículos.

2.3.1 Características superficiales

Las características superficiales hacen referencia a diversas propiedades que debe presentar la superficie del firme, también conocida como capa de rodadura, y que está relacionado con la seguridad y comodidad experimentada por el usuario. Las más importantes son:

1.- **Resistencia al deslizamiento:** Muy importante para asegurar el contacto en todo momento entre vehículo y carretera, sobre todo en los tramos complicados. Esta propiedad está íntimamente relacionada con la textura superficial del firme y el tipo de árido empleado en su construcción.

2.- **Resistencia superficial:** Afecta sobre todo a la comodidad del usuario y viene determinada por el grado de alabeo tanto longitudinal como transversal del pavimento. En este sentido, las deformaciones con pequeñas longitudes de onda son las que mayor sensación de incomodidad producen, conllevando en ocasiones cierto peligro.

3.- **Drenaje superficial:** La rápida evacuación de las aguas pluviales caídas directamente sobre el firme hacia los laterales es otro factor a considerar de cara a la seguridad de los usuarios. Un correcto drenaje superficial evita salpicaduras, pérdidas de agarre, y fenómenos de "aquaplaning".

4.- **Reflexión lumínica:** El brillo del firme, producido por la reflexión de fuentes luminosas, el sol durante el día, o los faros y luminarias por la noche, es otra propiedad a considerar, para evitar molestos y peligrosos fenómenos de reducción de visibilidad y deslumbramiento, especialmente por la noche.

5.- **Ruido de rodadura:** La generación del ruido ocasionada por el contacto entre neumático y pavimento es una de las principales fuentes de contaminación acústica en núcleos de población. Además, los ocupantes del vehículo también sufren de forma continua sus efectos nocivos.

Estos aspectos del firme están principalmente asociados con la textura y regularidad superficial del pavimento. En la Tabla 1 puede observarse la incidencia de cada uno de estos factores sobre las cualidades del firme. Dentro de la textura se suele distinguir entre la *microtextura*, irregularidades superficiales del pavimento menores de 0.5 mm, la *macrotextura*, irregularidades de 0.5 a 50 mm, y la *megatextura*, irregularidades de 50 a 500 mm.

La primera sirve para definir la aspereza del pavimento, la segunda su rugosidad y la tercera está más asociada con los baches que puede haber en el firme.

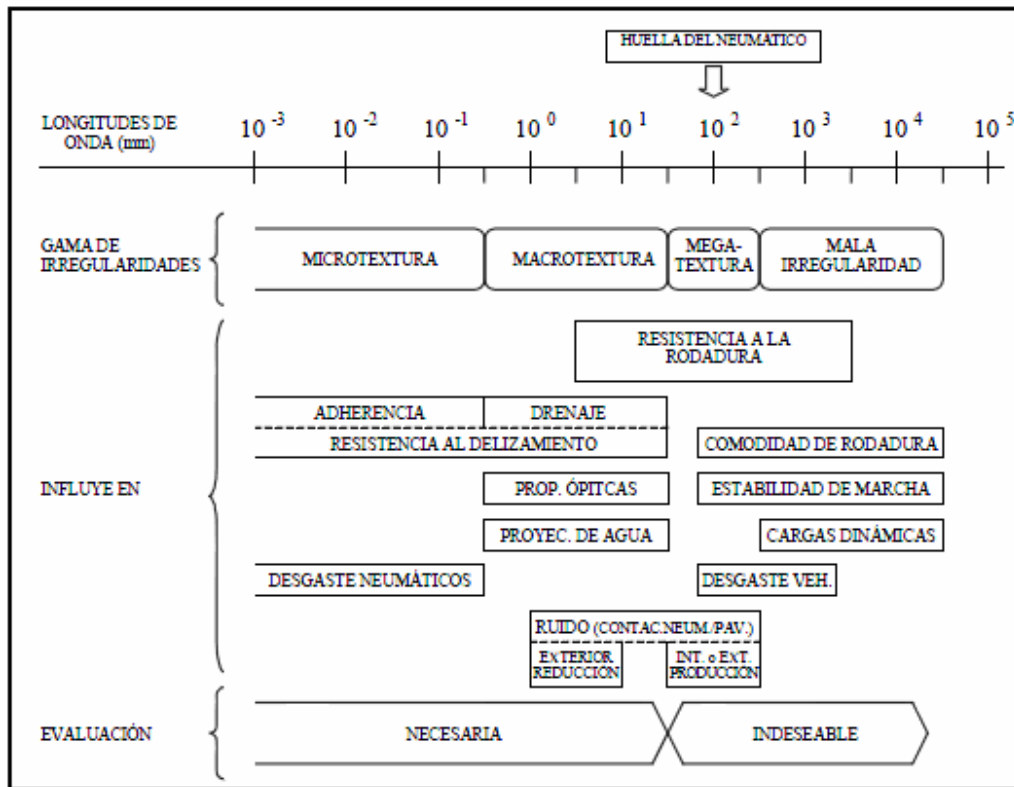


Tabla 1. Efecto de las características superficiales en los firmes

Como puede observarse en dicha tabla, la microtextura, la aspereza del pavimento, es necesaria para conseguir una buena adherencia. La macrotextura es necesaria para mantener esa adherencia a altas velocidades o con el pavimento mojado. La macrotextura mejora también la visibilidad con pavimento mojado, elimina o reduce los fenómenos de reflexión de la luz, que tienen lugar en los pavimentos lisos mojados, y mejora la percepción de las marcas viales. Por contra, los pavimentos rugosos, con fuerte macrotextura, producen un mayor desgaste de los neumáticos y suelen resultar ruidosos.

La megatextura y la irregularidad superficial resultan indeseables desde cualquier punto de vista. Inciden negativamente sobre la comodidad y aumentan el ruido de rodadura, los gastos de mantenimiento de los vehículos y los gastos de conservación de la vía.

2.3.2 Características estructurales

Se hallan relacionadas directamente con las propiedades resistentes (físicas y mecánicas) de los materiales que constituyen el firme y con el espesor de las capas que lo conforman.

Los materiales pétreos que componen cada capa deben ser cuidadosamente seleccionados, de forma que se garantice una calidad suficiente para que el firme sea resistente y duradero. En este sentido, es importante que los áridos presenten una adecuada composición granulométrica, una forma regular con bordes angulosos y un bajo contenido en finos. La normativa española, mas concretamente el PG-3 (pliego de prescripciones técnicas), especifica con mayor detalle los requisitos que deben cumplir los materiales en función de la capa.

El espesor de las capas también define la forma de transmisión y el grado de amortiguamiento de las vibraciones ocasionadas por los vehículos. Lógicamente, un mayor grosor contribuirá a mejorar las propiedades resistentes de una determinada capa.

El diseño de cada capa debe ser armónico con el de los limítrofes, de forma que las tensiones se disipen gradualmente, consiguiendo un buen comportamiento estructural del conjunto.

Puede decirse que un firme bien proyectado es aquél en el que todas sus capas trabajan a la máxima tensión admisible y presentan un coeficiente de seguridad a la rotura similar, de forma que teóricamente todas ellas colapsarían a la vez ante una sollicitación excesiva.

Una afirmación que puede extraerse del anterior párrafo es que la calidad de un firme no depende de su espesor, tal y como se creía antiguamente, sino de la homogeneidad tensional, es decir, de unas condiciones de trabajo similares en cada capa del firme.

En el siguiente esquema, se resume de manera intuitiva los conceptos importantes de este apartado 2.3 :

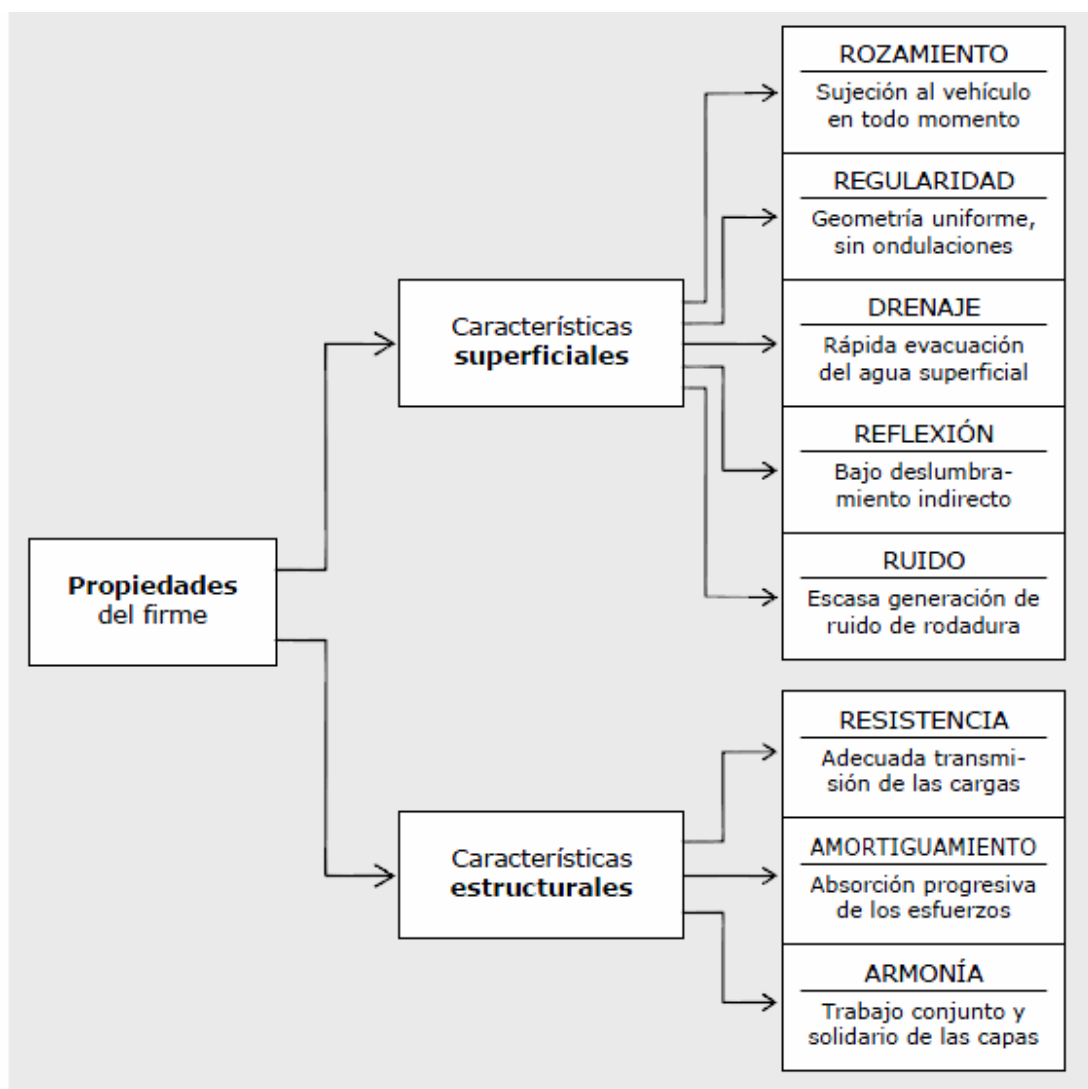


Tabla 2. Resumen de las propiedades del firme

2.4 Tipos de firmes

Actualmente, la técnica de construcción de carreteras cuenta con una gran variedad de firmes que se adaptan a las diferentes exigencias del entorno. No obstante, y atendiendo a la composición de sus capas, y por tanto, a la forma que tienen de resistir y transmitir los esfuerzos, pueden distinguirse los siguientes tipos, recogidos en este esquema:

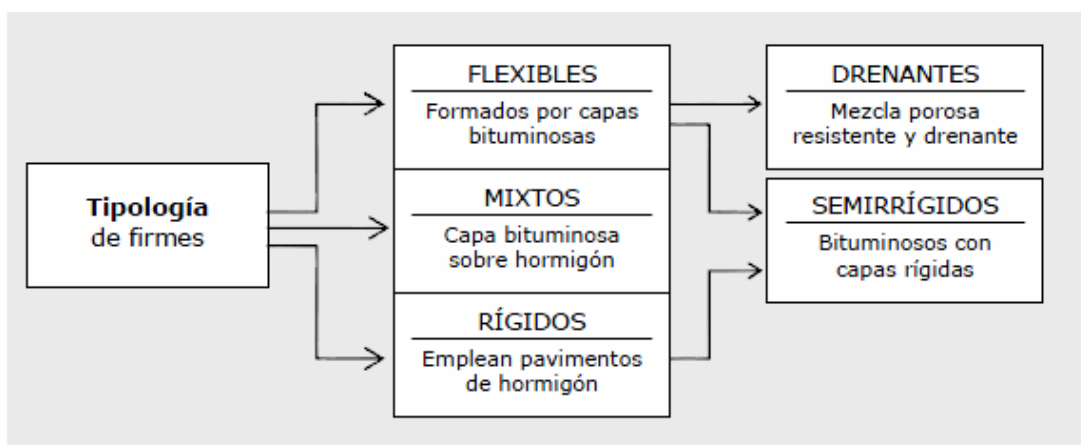


Tabla 3. Tipología de firmes

2.4.1 Firmes flexibles

Este tipo de firmes se caracterizan por estar constituidos por una serie de capas cuyos materiales presentan una resistencia a la deformación decreciente con la profundidad; este hecho obedece al mantenimiento de la proporcionalidad entre tensión y deformación en cada punto del firme, intentando conseguir un trabajo conjunto de la totalidad de las capas.

Las capas más superficiales están formadas por mezclas bituminosas, compuestas por áridos y ligantes hidrocarbonados convenientemente dosificados, lo que otorga al firme el carácter flexible que le da nombre. Estas capas se apoyan sobre capas granulares formadas por zahorras de origen natural o artificial, de menor capacidad portante, encargadas de repartir adecuadamente las tensiones verticales.

Dentro de este tipo de firmes encontramos los drenantes y semirrígidos. En concreto, la capa de rodadura de los flexibles drenantes, son el objeto de estudio de este proyecto.

Firmes semirrígidos

El aumento de las intensidades y las cargas de tráfico dio lugar a los **firmes semirrígidos**, que presentan sus capas inferiores estabilizadas con cemento o mayores espesores de las capas bituminosas. Este hecho dota al firme de una mayor rigidez y de un comportamiento estructural muy distinto, ya que la capacidad portante de las capas aumenta con la profundidad.

A pesar de esta notable diferencia, los firmes semirrígidos suelen incluirse dentro del grupo de los firmes flexibles debido a la análoga composición de sus capas superiores, formadas por mezclas bituminosas.

Firmes drenantes

Este tipo de firmes ha surgido con la aparición de los nuevos betunes modificados con polímeros (BMP). La innovación que presentan con respecto a los firmes tradicionales es la doble función **drenante** y **resistente** de la capa de rodadura; de este modo, el agua caída sobre el firme se filtra directamente, evacuándose por gravedad a través de la red porosa.

Además de mejorar las condiciones de resistencia al deslizamiento en firme mojado se reducen otras características indeseables, tales como la producción de ruido o la generación de charcos y salpicaduras. En zonas secas, presentan el inconveniente de que la red porosa puede llegar a obturarse por falta de precipitaciones que vayan lavando las partículas en suspensión.

2.4.2 Firmes rígidos

Los firmes rígidos constan de un pavimento formado por una losa de hormigón apoyada sobre diversas capas, algunas de ellas estabilizadas. Se distinguen distintos tipos en función de la clase de pavimento empleado. En este tipo de firme la losa actúa al mismo tiempo como capa de rodadura y como capa base. La capa soporte no tiene ningún fin estructural sino el de proporcionar una capa de apoyo adecuada a la losa de hormigón y facilitar la construcción de esta. Dentro de los pavimentos de hormigón se engloban:

- Pavimento de hormigón armado
- Pavimento de hormigón pretensado
- Pavimento de hormigón compactado
- Pavimentos prefabricados de hormigón
- Pavimento de losas cortas o largas

También se engloban los adoquines de hormigón, empleados sobre todo en zonas urbanas e industriales dado su alta resistencia al tráfico pesado.

2.4.3 Firmes mixtos

Este tipo de firmes viene a ser un híbrido entre los dos grandes grupos ya comentados anteriormente. Su pavimento está formado por una capa de hormigón de baja calidad, recubierta por un pavimento bituminoso, que es el que asumirá las características de rodadura. Se emplean sobre todo en zonas urbanas, y se justifican por la presencia de redes de servicios bajo la calzada, que deben protegerse de la acción del tráfico pero que con frecuencia deben ser objeto de operaciones de reparación y mantenimiento.

2.5 Constitución del firme

Como ya se ha dicho, el firme es una estructura multicapa constituida por un conjunto estratificado de capas sensiblemente horizontales que reposan una sobre otra, pudiendo existir entre ellas distintos tipos de tratamientos que mejoren su adherencia.

Tradicionalmente se distinguen cuatro zonas dentro del firme, en función del cometido que desempeñan. Cada una de estas zonas puede estar compuesta por una o más capas:

(a) **Pavimento:** Es la parte superior del firme, encargada de resistir directamente las solicitaciones originadas por el tráfico. Además, actúa como medio de contacto con el vehículo, por lo que es el responsable de las características superficiales del firme. Estructuralmente, absorbe los esfuerzos horizontales y parte de los verticales.

(b) **Capas de base y sub-base:** Situada justo debajo del pavimento, tiene una función eminentemente resistente, amortiguando gran parte de las cargas verticales. Pueden estar formadas por zahorras naturales o artificiales, o por materiales granulares tratados con algún tipo de conglomerante.

(c) **Capas especiales:** Se emplean en circunstancias especiales, como en terrenos heladizos (capa anti-hielo) o en suelos de mala calidad (capa anticontaminante).

(d) **Explanada mejorada:** Es la capa más superficial de la obra de tierra que soporta el firme, estando convenientemente preparada para su recepción.

En el caso de firmes con mezclas bituminosas, existen además una serie de “**capas de espesor cero**”, constituidas por **riegos asfálticos** aplicados durante la construcción del firme en la superficie de determinadas capas para mejorar sus características de adherencia con la capa superior.

En el siguiente dibujo, podemos apreciar las distintas capas que componen el firme. A continuación, se detallan las capas del firme flexible en la imagen 1:

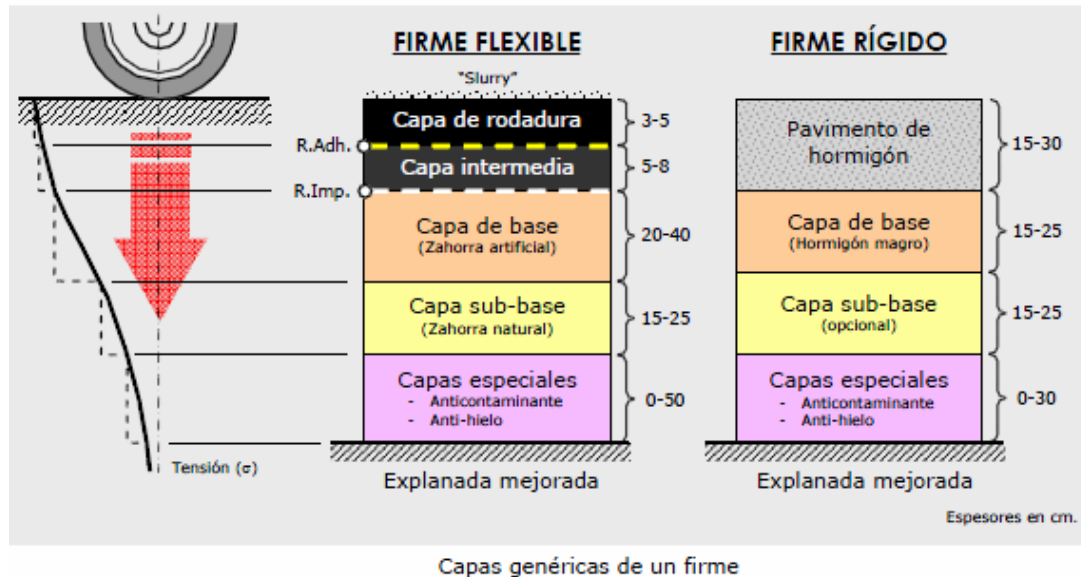


Imagen 1. Capas genéricas de un firme

2.5.1 Capa de rodadura

Esta capa conforma la parte más superficial del pavimento, por lo que está sometida a la intemperie y en contacto directo con los neumáticos; por ello, es la que está sometida a un mayor número de exigencias, debiendo cumplir estos 4 requisitos:

1.- Debe ser **resistente**, ya que debe resistir fuertes presiones verticales de contacto ejercidas por los neumáticos (hasta 15 kg/cm^2 , considerando impactos) y absorber la práctica totalidad de los esfuerzos tangenciales provocados por el frenado, la aceleración centrífuga o la propia rodadura de los vehículos.

2.- Otro requisito que debe cumplir es el de ser **antideslizante**, ofreciendo un coeficiente de resistencia al deslizamiento entre neumático y carretera –tanto longitudinal como transversal- suficiente para garantizar la seguridad de los usuarios, especialmente en condiciones meteorológicas adversas. Una textura superficial áspera con áridos angulosos favorecerá este aspecto.

3.- También debe ser **duradera**, es decir, que sus propiedades perduren a lo largo del tiempo, degradándose lo menos posible. Suele exigirse al firme una durabilidad correspondiente al periodo de proyecto estipulado, normalmente entre 15 y 25 años.

Para mejorar las cualidades adherentes de esta capa, puede aplicarse sobre ellas un riego de una mezcla denominada comunmente *slurry* de varios milímetros de espesor, compuesto por un mortero de arena silícea y betún asfáltico que aumenta el rozamiento, sobre todo en carreteras deterioradas por el uso, con áridos excesivamente pulidos:



Imagen 2. Extensión de una capa de slurry sobre un firme en servicio

4.- Por último, debe ser **impermeable**, evitando el paso del agua a capas más profundas y susceptibles a la presencia del líquido elemento. Además, debe poseer una textura superficial que facilite la evacuación de las aguas pluviales.

CAPAS DE RODADURA DRENANTES

Las capas de rodadura drenantes constituyen un tipo particular de pavimento que fue inicialmente concebido para mejorar la circulación con lluvia y evitar el problema de *aquaplaning* o hidroplaneo.

La presencia de agua sobre el pavimento dificulta el contacto del neumático con la superficie del firme, dando lugar a que se produzcan con mayor facilidad ocasiones para el deslizamiento y el vuelco de los vehículos que circulan a altas velocidades.

Con objeto de mejorar la adherencia neumático-pavimento con lluvia o en presencia de agua, se ha desarrollado este tipo de pavimento que facilita la evacuación del agua a su través y el contacto neumático-pavimento.

En esencia consiste en colocar en los 3-5 centímetros superiores del firme una mezcla porosa que actúa como capa de rodadura drenante. Esta capa absorbe y elimina el agua de la superficie del firme, conduciéndola a su través hacia las zonas laterales fuera de la calzada. De esta manera se consigue prácticamente eliminar el problema de hidroplaneo. Como se viene diciendo desde el principio del proyecto, este tipo de mezclas asfálticas que se emplean en esta zona, son el objeto esencial de estudio.

Además, el empleo de estas capas ha puesto de manifiesto, respecto a los pavimentos convencionales, otra serie de ventajas tan importantes como la anterior, algunas de las cuales se aprecian cualitativamente en las imágenes 3 y 4, donde se recoge el aspecto con lluvia de dos tramos contiguos de carretera, pavimentado el uno con una mezcla convencional y el otro con una mezcla porosa.



Imagen3. Aspecto de un pavimento tradicional con lluvia



Imagen 4. Aspecto de un pavimento poroso con lluvia

Ventajas que se aprecian:

- 1.- *Elimina el agua proyectada y pulverizada por el paso de los vehículos.*
- 2.- *Evita la reflexión de la luz.*
- 3.- Tiene una *macrotextura elevada*, adecuada para mantener la adherencia neumático pavimento a altas velocidades.
- 4.- *Pavimento de rodadura cómoda y silenciosa.*
- 5.- *Durabilidad:* El mayor porcentaje de huecos de estas mezclas puede favorecer la acción oxidante y de envejecimiento de los agentes atmosféricos. No obstante, este proceso de deterioro se ve contrarrestado por la mayor riqueza de ligante de estas mezclas, con una espesa película de betún recubriendo los áridos. El alto contenido de huecos también puede favorecer el efecto de desenvuelta del ligante por el agua, fallo que se produciría en el caso de existir una mala adhesividad entre el árido y el ligante o en el caso de usar fílleres hidrofílicos.

2.5.2 Capa intermedia o binder

Se halla inmediatamente debajo de la capa de rodadura, sirviendo de intermediaria entre dicha capa y las situadas a mayor profundidad. Su función principal es constituir una superficie de apoyo bien nivelada y uniforme sobre la que se pueda extender la capa de rodadura con un espesor constante; también colabora con ésta en la transmisión de los esfuerzos verticales del tráfico convenientemente atenuados a capas inferiores, y acabando de absorber los horizontales, de forma que no alcancen las capas granulares.

Todo ello permite reducir la calidad de los materiales empleados en esta capa, reduciendo la cantidad de conglomerante y la calidad superficial del árido, lo que abarata su coste. Funcionalmente, la capa intermedia debe ser únicamente resistente y duradera, y de características similares a la de rodadura para evitar saltos tensionales excesivos.

La capa intermedia es típica de firmes flexibles o bituminosos. De hecho, en firmes rígidos no existe esta distinción entre capas de rodadura e intermedia, disponiéndose un único pavimento de hormigón, de entre 20 y 25 cm de espesor.

2.5.3 Capa de base

Constituye el principal elemento portante de la estructura del firme, debiendo repartir y absorber la práctica totalidad de las cargas verticales que, aunque atenuadas, penetren a su seno. En firmes rígidos y semirrígidos, esta función de reparto de cargas está distribuida entre el pavimento y la propia capa de base, al tener características resistentes similares. La capa base presenta, por tanto, una función eminentemente resistente, debiendo ser además compacta y duradera para que sus características mecánicas sean lo más homogéneas posibles durante todo el periodo de proyecto. Se puede apreciar una imagen de la capa base puesta en obra, en la imagen 5.

Existen diferentes tipos de bases, que emplean uno u otro tipo de material en función de la calidad exigida por las solicitudes del tráfico:

- *Bases granulares*: Formadas por materiales granulares sin ningún tipo de aglomerante. En función de su granulometría, pueden ser continuas (zahorras) o discontinuas (macadam).

- *Bases granulares estabilizadas*: Al material pétreo se le añade una sustancia aglomerante –normalmente cal o cemento- para mejorar sus cualidades resistentes y aumentar su rigidez.

- *Bases bituminosas*: Compuestas a base de mezclas bituminosas en caliente o en frío, con dosificaciones más pobres que las empleadas en las capas que conforman pavimento. Aun así, son bases de muy buena calidad.

- *Bases especiales*: Integradas por materiales procedentes de procesos industriales.



Imagen 5. Aspecto de la capa base puesta en obra

2.5.4 Capa sub-base

Realmente se trata de una base de peor calidad, dado que no tiene que resistir cargas excesivas del tráfico, al llegarle muy atenuadas por efecto de las capas superiores; se limita a proporcionar una buena capa de asiento a la base, de forma que se facilite su puesta en obra y compactación. En cambio, sí que posee una importante función drenante, alejando el agua de las capas superiores del firme.

2.5.5 Explanada mejorada

En muchos casos, esta capa no se considera como perteneciente al firme, sino a la explanación u obra de tierra. Sin embargo, su función es muy importante respecto de aquél, ya que le dota de una base uniforme y de buena capacidad portante.

Los materiales que se emplean en su confección son suelos seleccionados, a ser posible procedentes de la propia excavación o de los alrededores de la obra.

2.5.6 Capas especiales

Dentro de este grupo de capas se engloban aquéllas que, aunque no son imprescindibles en la constitución del firme, pueden ser necesarias en determinadas circunstancias climáticas o geológicas. Destacan las siguientes:

(a) **Capas anticontaminantes:** Cuando la explanada natural está formada por suelos de mala calidad, con un alto componente arcilloso u orgánico, se recurre al empleo de este tipo de capas que actúan a modo de filtro, impidiendo el paso de estos materiales a capas superiores. Se componen de materiales granulares, arenas sobre todo, capaces de retener los finos y permitir el paso del agua a la sub-base.

(b) **Membranas y geotextiles:** Este tipo de elementos han ido sustituyendo a las capas anticontaminantes ya que son más ligeros y efectivos, consiguiendo aislar rigurosamente la explanada de las capas del firme.

(c) **Capas anti-hielo:** Se emplean en zonas de bajas temperaturas, donde el suelo está sujeto a un continuo proceso de congelación y descongelación. Estas capas suelen tener un espesor considerable –entre 40 y 60 cm-, empleándose para su construcción materiales granulares insensibles a la helada.

(d) **Capas estabilizadas:** En zonas de frecuentes lluvias puede ser necesario estabilizar con betún o cemento los últimos centímetros de la coronación de la explanación, para protegerla del agua y permitir el paso de la maquinaria de obra.

2.6 Materiales empleados en la construcción de firmes

Las materias primas empleadas en la confección de las diferentes capas de un afirmado son las que se citan a continuación:

- **Suelos granulares seleccionados:** Empleados para confeccionar la explanada mejorada e incluso ciertas capas del firme, ayudados por algún tipo de conglomerante.

- **Materiales pétreos:** Los áridos, tanto naturales como de machaqueo, son parte indispensable del firme, ya que forman su esqueleto resistente y confieren al mismo sus características superficiales y estructurales más importantes.

- **Ligantes bituminosos:** Este grupo lo conforman aquellos materiales obtenidos de la destilación del petróleo y que desempeñan un papel aglomerante. De entre ellos cabe destacar los betunes asfálticos, emulsiones bituminosas, betunes fluidificados o las emulsiones.

- **Conglomerantes hidráulicos:** Empleados en la confección de capas granulares estabilizadas o de capas de rodadura en pavimentos rígidos (de hormigón). Los más empleados en carreteras son el cemento y la cal aérea, aunque también se usan otros de origen industrial: escorias granuladas, cenizas volantes, etc.

- **Agua:** Imprescindible para la humectación y compactación de las capas granulares, confección de riegos y mezclas bituminosas o la fabricación del hormigón empleado en los pavimentos y bases de los firmes rígidos.

- **Materiales auxiliares:** Dentro de este grupo se incluyen las armaduras de acero empleadas en el armado de firmes rígidos, aireantes, colorantes y plastificantes para hormigones, activantes para las mezclas bituminosas, geotextiles, etc.

Todos estos materiales se combinan entre sí para formar diferentes mezclas y compuestos, que son los que realmente configuran el firme. Los más empleados son:

- **Capas granulares:** Formadas únicamente por áridos de granulometría continua, zahorras naturales y artificiales, o de granulometría discontinua y uniforme, como es el caso del macadam.

- **Estabilizaciones:** En este grupo de compuestos se engloban los suelos estabilizados con conglomerantes –cemento o cal- o productos bituminosos. Algunos de los más populares son la gravacemento, gravaescoria, gravaemulsión, etc.

- **Mezclas bituminosas:** Compuestas por áridos embebidos en un ligante bituminoso. Reciben diferentes denominaciones en función de su apariencia, constitución y puesta en obra. Se emplean en las capas superficiales de los firmes flexibles.

- **Hormigones:** Forman el pavimento de los firmes rígidos

- **Tratamientos superficiales y riegos:** En este grupo se engloban diferentes compuestos cuya misión es mejorar determinadas características del firme o restaurar aquéllas que se han perdido con el paso del tiempo. Destacan los *slurrys*, los riegos de imprimación, adherencia y curado y las lechadas bituminosas.

Capítulo 3: Mezclas asfálticas en la construcción de firmes

3.1 Definición

Las mezclas asfálticas, también reciben el nombre de aglomerados, están formadas por una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonado, de manera que aquellos quedan cubiertos por una película continua de éste.

Las mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por un 90 % de agregados pétreos grueso y fino, un 5% de polvo mineral (filler) y otro 5% de ligante asfáltico. Los componentes mencionados anteriormente son de gran importancia para el correcto funcionamiento del pavimento y la falta de calidad en alguno de ellos afecta el conjunto. El ligante asfáltico y el polvo mineral son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica como en su costo total.

En el siguiente apartado se explica con detalle estos componentes de las mezclas asfálticas.

3.2 Componentes de las mezclas asfálticas

Como se ha visto anteriormente, se constituyen de dos elementos importantes: los agregados pétreos y el ligante.

3.2.1 Agregados pétreos

3.2.1.1 Definición

Los materiales pétreos o áridos se definen como un conjunto de partículas minerales de distintos tamaños y formas y que proceden de la fragmentación natural o artificial de las rocas. Este tipo de materiales constituyen un elevado porcentaje en la constitución de las distintas capas de un firme, normalmente superior al 90% en peso. Puede decirse, por tanto, que forman el esqueleto resistente del firme. Por ello, es importante tener en cuenta la procedencia de estos áridos a la hora de hacer una carretera, pues si los áridos no se encuentran relativamente cerca, esto implica un aumento en los costes de fabricación, debido al transporte de un gran volumen de los mismos.

Asimismo, para determinar la validez de este tipo de elementos se establecen diferentes procedimientos normalizados de ensayo, cuyo fin es cuantificar cada una de las propiedades exigibles a un árido, dependiendo de la capa del firme de la que forme parte. Estos ensayos deben realizarse sobre muestras representativas para garantizar su calidad.

3.2.1.2 Clasificación de los áridos

Atendiendo al esquema de la siguiente imagen, podemos clasificarlos según 4 parámetros:

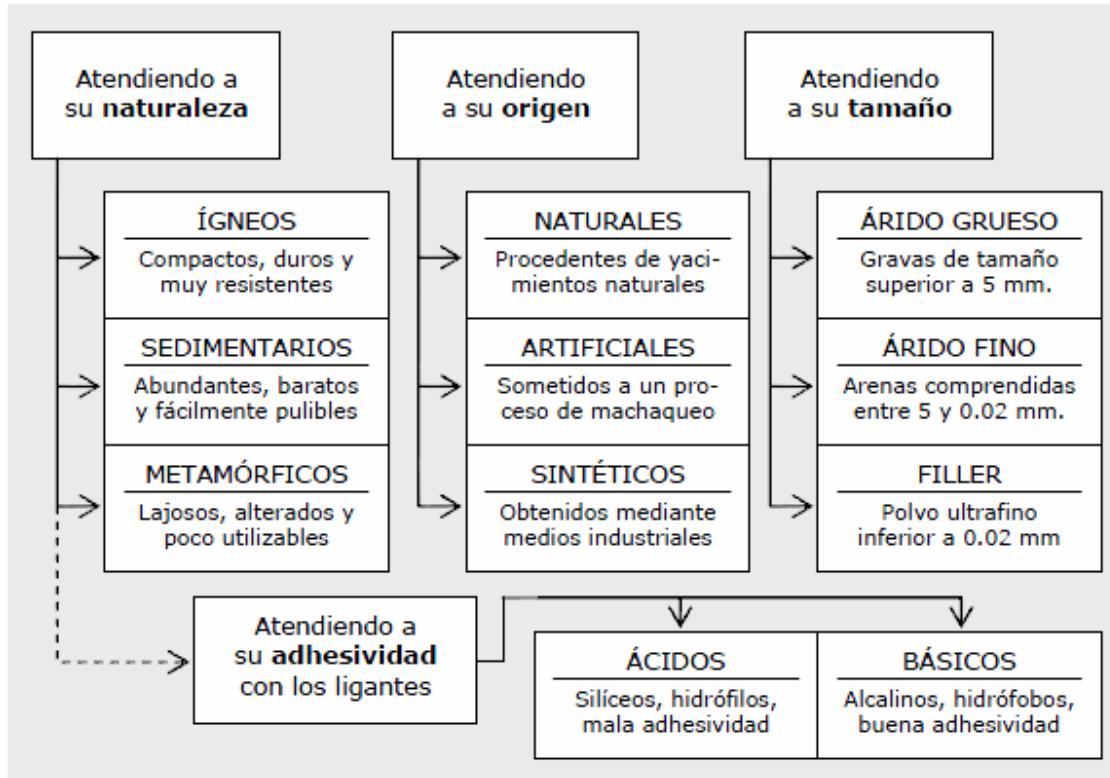


Tabla 4. Clasificación de los áridos

3.2.1.2.1 Criterio de naturaleza mineral

Es de sobra conocida la gran variedad de rocas existentes, divididas en tres grandes grupos genéticos: rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. A su vez, dentro de éstos existen subgrupos, familias y series minerales que agrupan materiales de composición afín.

La idoneidad de un determinado árido depende principalmente de una serie de factores relacionados con las características intrínsecas de la propia roca, aunque pueden influir de manera notable aspectos como su correcta fabricación, transporte y puesta en obra.

De cara al análisis para su empleo en carreteras, resulta práctico establecer grupos que reúnan materiales de parecida composición mineralógica y estructura interna, lo que asegura una cierta homogeneidad en el comportamiento de los áridos dentro de un mismo grupo.

De acuerdo con esta clasificación, diferenciando entre ácidos y básicos, los áridos más comunes en la construcción de carreteras se resumen en el siguiente esquema:

CLASE/Grupo			Propiedades	Ejemplos
ÍGNEAS	Básicas	BASALTOS	<ul style="list-style-type: none"> - Rocas máficas (oscuras) - Alta resistencia mecánica - Bajo desgaste al pulido - Buena adhesividad 	Basalto, andesita, diabasa, ofita, lamprófidio y traquita
		GABROS	<ul style="list-style-type: none"> - Buen comportamiento mecánico en carreteras - Durables y resistentes - Relativa escasez, zonificadas 	Gabro, diorita, gneis básico, peridotita y sienita
	Ácidas	GRANITOS	<ul style="list-style-type: none"> - Abundantes en la Península - Pueden presentarse alteradas - Rocas abrasivas, poco pulibles - Escasa adhesividad a los ligantes - Presentan cierta fragilidad 	Granito, cuarzodiorita, gneis, aplita granodiorita y pegmatita
		PÓRFIDOS	<ul style="list-style-type: none"> - Textura adecuada para firmes - Bajo desgaste al pulimento - Problemas de adhesividad 	Pórfidos, dacita y riolita
SEDIMENTARIAS	Básicas	CALIZAS	<ul style="list-style-type: none"> - Muy abundantes en España - Muy susceptibles al pulido - Buena adhesividad - Fácil extracción y tratamiento 	Caliza, dolomía y mármoles
	Ácidas	ARENISCAS	<ul style="list-style-type: none"> - Muy resistentes al pulimento - Presentan un elevado desgaste - Buena adherencia a ligantes - Muy escasos en la Península 	Arenisca, arcosa, molasa, grauvaca, tobas y conglomerados
		PEDERNAL	<ul style="list-style-type: none"> - Muy duras y quebradizas - Buena resistencia al desgaste - Dan áridos lajosos y cortantes - Muy susceptibles al pulimento 	Pedernal, sílex, cornubianita y ftanita
		CUARCITAS	<ul style="list-style-type: none"> - Muy duras y resistentes - Difícil extracción y machaqueo - Pueden presentar alteraciones - Escasísima adhesividad 	Cuarcita, cuarzoarenita y cuarzo
METAM		ESQUISTOS	<ul style="list-style-type: none"> - Formas lajosas y alteradas - Elevado peso específico - Válidos si no contienen mica 	Esquistos, filitas y pizarras

Tabla 5. Áridos más comunes empleados en carreteras

3.2.1.2.2 Criterio de procedencia

Existen diferentes formas de obtener materias primas para la construcción de carreteras, pudiendo establecerse una clasificación de los áridos en función de su lugar de procedencia:

(a) **Áridos naturales:** Dentro de este grupo se engloban aquellos áridos que se encuentran ya machacados, pudiendo ser directamente empleados tal y como se encuentran en la naturaleza; únicamente es necesario someterlos a un proceso de selección, refinado y clasificación por tamaños. Se hallan en graveras, canteras y otro tipo de yacimientos al aire libre, por lo que su extracción es relativamente sencilla.

(b) **Áridos artificiales o de machaqueo:** Obtenidos a partir de la disgregación de un macizo rocoso, empleando generalmente procedimientos de voladura con explosivos. Necesitan un mayor tratamiento que los anteriores, por lo que es necesario procesarlos en plantas de machaqueo; en ellas, el material es limpiado, machacado, clasificado y almacenado en acopios.

(c) **Productos sintéticos industriales:** Este grupo lo componen materiales de diversa índole, como productos de desecho o subproductos de procesos industriales, materiales calcinados, procedentes de la demolición y reciclado de firmes existentes o áridos manufacturados con características mejoradas.

3.2.1.2.3 Criterio de adhesividad árido-ligante

La adhesividad de los agregados pétreos con los ligantes asfálticos es de gran importancia, debido a que se pueden presentar fenómenos fisicoquímicos en la superficie de los agregados empleados en las capas de firme. En estos fenómenos complejos intervienen tanto factores físicos como la textura del agregado, la porosidad del mismo, viscosidad y tensión superficial del ligante, espesor de la película de ligante, etc. Y a su vez factores químicos relativos al ligante y al agregado. Si los agregados están absolutamente secos, se dejan mojar fácilmente por los ligantes asfálticos; sin embargo la situación es muy diferente con algo de humedad que siempre puede existir, ya que la superficie del agregado se polariza con un signo u otro dependiendo de su naturaleza. Atendiendo a ese criterio los agregados se clasifican en ácidos y básicos:

(a) Agregados Ácidos:

La acidez es por lo general consecuencia de un alto contenido en sílice y determina una gran afinidad del agregado por el agua (hidrofilia) y una polaridad negativa. La adhesividad entre los agregados silíceos (o ácidos en general) y los ligantes asfálticos no es buena, pudiendo llegar a ser necesaria la disminución de la tensión superficial del ligante mediante procesos de activación en los que se carga electropolarmente para crear una adhesividad.

(b) Agregados Básicos:

Son menos hidrofílicos que los silíceos y se cargan positivamente en presencia de agua. Por ello pueden presentar cierta atracción por los ácidos libres en los ligantes y, en consecuencia una mejor adhesividad con los mismos.

3.2.1.2.4 Criterio de granulometría

(a) **Áridos gruesos:** Están compuestos fundamentalmente por gravas. Este tipo de áridos presentan tamaños comprendidos entre 60 y 5 mm. y conforman el esqueleto mineral en cualquier tipo de mezcla bituminosa.

(b) **Áridos finos:** Se corresponden con las arenas, por lo que se excluyen aquellas partículas que no atraviesen el tamiz de 5 mm. de la serie UNE. Generalmente se emplean como recebo del árido grueso, de forma que ocupen los huecos existentes, para hacer la mezcla más compacta.

(c) **Filler o rellenedor:** Se define como la fracción mineral que pasa por el tamiz 0.063 mm . Esta especie de polvillo fino se obtiene como un producto residual procedente del lavado de los áridos machacados. Dada su gran superficie específica, desempeña un papel fundamental en las mezclas bituminosas, mejorando en ciertos casos sus propiedades reológicas.

3.2.1.3 Propiedades y caracterización de los áridos

La aptitud de un árido como material de construcción depende de las propiedades físicas y químicas de sus partículas, por lo que es necesario establecer procedimientos normalizados de ensayo para su determinación. Además, según sea la capa del firme a la que vaya destinado, se le exigirán ciertas propiedades y características que aseguren su correcto comportamiento.

Para asegurar que las muestras ensayadas sean representativas del conjunto del lote, es necesario establecer un procedimiento de toma de muestras, recogido en la Norma NLT-148. El número y la forma de selección de las muestras varía en función del tipo de material tratado, empleándose generalmente cuarteadores para erradicar las posibles heterogeneidades; de esta forma se asegura cierta fiabilidad en los resultados obtenidos. En la imagen 6, se puede apreciar el cuarteador empleado para las muestras representativas de este proyecto.



Imagen 6. Cuarteador

A continuación se detallan las propiedades más reseñables de los áridos desde el punto de vista de su empleo en afirmados, así como los procedimientos de ensayo requeridos para su determinación. Casi todos ellos están referidos al árido grueso, por lo que se dedica un apartado especial a los finos y el *filler*.

3.2.1.3.1 Propiedades de conjunto: granulometría

El **análisis granulométrico** (NLT-150) tiene por objeto determinar la distribución de tamaños de las partículas existente en una muestra seca de árido. Para ello se emplea una serie normalizada de tamices, ordenados de mayor a menor luz de malla, a través de los cuales se hace pasar el material.

Es importante conocer esta distribución, ya que influye de forma decisiva en la resistencia mecánica de la capa del firme que contenga dicho árido. La normativa española, en base a la experiencia adquirida a lo largo de los años, recoge diversos **husos granulométricos** para los diversos tipos de materiales que pueden emplearse en carreteras, debiendo ajustarse a ellos la curva granulométrica del árido ensayado. Más adelante, en el capítulo 4, se explicará con detalle los husos que rigen las mezclas elaboradas en el laboratorio para este proyecto (M10), bajo la norma que dicta el PG-3.

Como puede verse en el siguiente gráfico, existen dos tipos de granulometría: la continua y la discontinua.

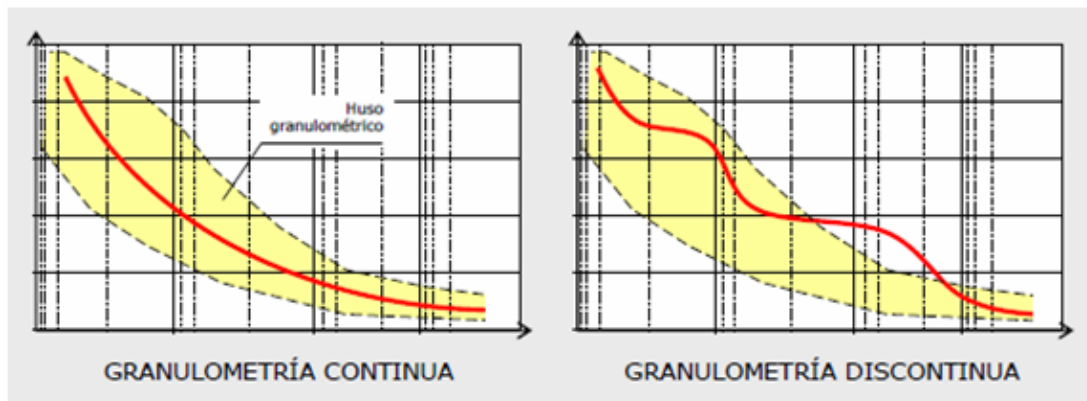


Imagen 7. Curvas granulométricas

(a) **Granulometría discontinua:** La curva presenta picos y tramos planos, que indican que varios tamices sucesivos no retienen material, lo que indica que la variación de tamaños es escasa.

(b) **Granulometría continua:** La práctica totalidad de los tamices retienen materia, por lo que existe una variación escalonada de tamaños de grano y la curva adopta una disposición suave y continua.

La mezcla M10 empleada para este proyecto, posee una granulometría discontinua, pues presenta un cambio brusco de pendiente. Esto se explicará en profundidad en los capítulos siguientes.

3.2.1.3.2 Forma y tamaño de los áridos. Angulosidad. Tamaño máximo.

La forma de un árido da una idea de la aptitud de su esqueleto mineral y, por tanto, de su resistencia mecánica.

Según su forma, pueden distinguirse principalmente cuatro tipos de áridos: *redondeados*, *cúbicos*, *lajas* y *agujas*. Los dos últimos, *lajas* y *agujas*, son los que presentan un mayor riesgo de rotura en presencia de carga, por lo que debe limitarse su proporción en el árido.



Imagen 8. Forma característica de los áridos

Índice de lajas y agujas

Como se ha comentado anteriormente, hay que tener en cuenta estos dos parametros, por el riesgo de rotura que presentan. Para determinar la proporción de estos elementos en la totalidad de la muestra de árido, se definen los *índices de lajosidad* (lajas) y *apuntamiento* (agujas) como el porcentaje en peso de lajas o agujas respectivamente, sobre el total de la muestra: (NLT-354)

$$I_L = \frac{\text{Peso de las lajas}}{\text{Peso de la muestra total}} \cdot 100 ; I_a = \frac{\text{Peso de las agujas}}{\text{Peso de la muestra total}} \cdot 100$$

Angulosidad

Otro aspecto morfológico que también influye en la resistencia de un árido es su angulosidad: si posee caras fracturadas con aristas vivas y una superficie rugosa presentará un mayor rozamiento interno, lo que hará al material más resistente mecánicamente. La angulosidad se evalúa midiendo el porcentaje de partículas con dos o más caras de fractura. (NLT-358)

Tamaño máximo

En cuanto al tamaño máximo de los áridos, hay que apuntar que generalmente viene limitado por factores relativos al espesor de la capa extendida, trabajabilidad del material, segregación, etc. También es importante restringir el contenido en partículas finas, dada la influencia que tienen en la plasticidad.

3.2.1.3.3 Resistencia mecánica al desgaste

Un aspecto fundamental a la hora de evaluar la validez de un árido para su empleo en firmes es determinar su comportamiento mecánico en las condiciones reales de funcionamiento de la vía. Para evaluar dicho comportamiento, así como la degradación de sus propiedades mecánicas a lo largo del tiempo, existen una serie de ensayos que, si bien logran determinar las propiedades mecánicas de dicho árido de forma aislada, no consiguen caracterizar el estado tensional del árido en el conjunto del firme. En nuestro país, los ensayos más comunes para caracterizar los áridos son el ensayo de desgaste de Los Ángeles (NLT -149) y el ensayo de friabilidad (NLT-351).

Destacar que en el presente estudio, los áridos no se han ensayado por separado mediante estos métodos, pues se dan por buenos por experiencia de la empresa. Si no fuese así, para garantizar resultados óptimos en el ensayo de las mezclas en probetas, sería obligatorio ensayar sus componentes por separado, tanto áridos como aquí se ha comentado, como los ensayos que deben cumplir los ligantes, que se explicará más adelante, en este mismo capítulo.

3.2.1.3.4 Resistencia al pulido

La resistencia al pulimento de las partículas de un árido, o lo que es lo mismo, su resistencia a perder aspereza en su textura superficial, influye notablemente en la resistencia al deslizamiento cuando dicho árido se emplea en la capa de rodadura.

Para medir la degradación de los áridos como consecuencia de la continuada fricción ocasionada por el paso de vehículos se han ideado diversos procedimientos de ensayo, entre los que destacan el péndulo de fricción (NLT-175) y el ensayo de pulimento acelerado (NLT-174) .

En el primer ensayo, se pretende determinar el coeficiente de rozamiento inicial que presenta un árido. En el segundo ensayo, el objetivo es simular el proceso de pulido progresivo al que se ve sometido un árido en la capa de rodadura del firme, en el que para conseguir el efecto de degradación a largo plazo, se emplean productos abrasivos combinados con agua.

3.2.1.3.5 Durabilidad

La vida media de una carretera ronda los 20 años, por lo que es necesario que los materiales que integran cada una de sus capas resistan la acción erosiva de elementos como el agua o los agentes atmosféricos. En este sentido, son importantes los ensayos que determinan la porosidad y absorción de agua de un árido; un mayor número de huecos favorece la penetración del agua, que deposita en los poros las sales disueltas en su seno, provocando la rotura del árido por un proceso de crecimiento cristalino (hialoclastia).

3.2.1.3.6 Afinidad entre árido y betún

Entre los fenómenos fisicoquímicos que se dan en la superficie de los áridos, el que más interés tiene desde nuestro punto de vista es la adhesividad entre el ligante bituminoso y el árido en cuestión.

La afinidad de los ligantes con la superficie de los áridos es un complejo fenómeno en el que intervienen gran cantidad de factores físicos y químicos, destacando la presencia de agua, ya que, como se ha indicado anteriormente, polariza la superficie de los áridos, dividiéndolos en dos grupos: ácidos y básicos.

.

En la siguiente imagen, se aprecian ejemplos de buena y mala adherencia entre árido y ligante, en diversas muestras:

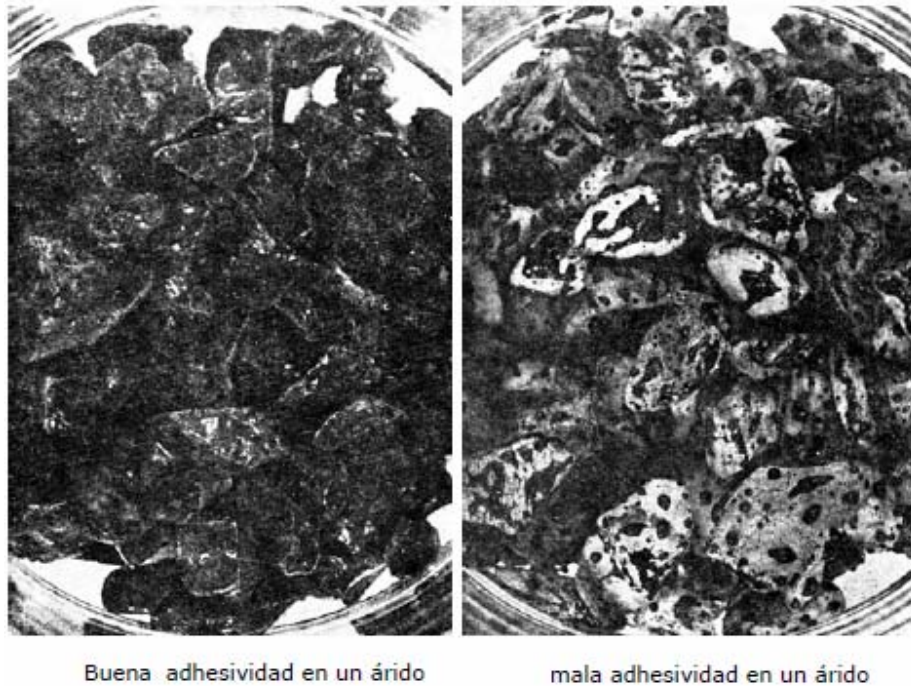


Imagen 9. Ejemplos de adhesividad árido-ligante

3.2.1.3.7 Propiedades de las partículas finas

La mayoría de las propiedades y ensayos vistos anteriormente hacen referencia a áridos gruesos, por lo que este apartado se centra en estudiar las particularidades que presentan los elementos finos y ultrafinos.

Áridos finos

El árido fino empleado en firmes se caracteriza fundamentalmente por tres propiedades: **limpieza**, **plasticidad** y **adhesividad**. La norma NLT-172 se encarga de definir un *coeficiente de limpieza* para áridos finos, de tal forma que no presenten elevada plasticidad. Para determinar el grado de plasticidad del árido fino se emplea el método del *equivalente de arena* (NLT-113). Un equivalente inferior a 20 corresponde a un árido muy contaminado, mientras que uno superior a 50 da idea de la pureza del árido fino. Otro aspecto a cuidar es la *adhesividad del árido-ligante*, dada la gran superficie específica de este tipo de partículas. A estos efectos se emplea el procedimiento de Riedel-Weber (NLT-355)

Filler o rellenedor

El filler empleado en carreteras puede proceder del machaqueo de los áridos, tratarse de un producto comercial de naturaleza pulverulenta (cemento, cenizas volantes, etc.) o un polvo generalmente calizo especialmente preparado para este fin. La normativa española da ciertas recomendaciones acerca de si el filler de las capas bituminosas puede ser el propio de los áridos o debe ser un material de aportación externa; en cualquier caso, debe tratarse de un material no plástico. En las restantes capas del firme, esta fracción se considera conjuntamente con el árido fino, siendo por supuesto de su misma naturaleza. Los ensayos de caracterización del filler habitualmente exigidos son el de emulsibilidad (NLT-180) y el de densidad aparente en tolueno (NLT-176).

Por todo esto visto anteriormente, se recoge en la siguiente tabla los parámetros que afectan a los áridos en las capas de rodadura.

Capa	Exigencias	Ensayos
RODADURA	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Árido bien graduado ▪ Resistente a las cargas de tráfico ▪ Bajo desgaste al pulido ▪ Inalterable ante agentes externos ▪ Buena forma y angulosidad ▪ Fracción fina poco contaminada ▪ Muy baja o nula plasticidad ▪ Buena adhesividad con los ligantes 	<ul style="list-style-type: none"> - Granulométrico - Forma y angulosidad - Pulimento acelerado - Desgaste de Los Ángeles - Acción de sulfatos - Inmersión-compresión - Equivalente de arena - Emulsibilidad del filler

Tabla 6. Exigencias en áridos para capas de rodadura

3.2.2 Ligantes

3.2.2.1 Definición y tipos.

Los ligantes que se utilizan para la fabricación de mezclas bituminosas para carreteras son los betunes asfálticos. Son materiales bituminosos de color negro procedentes de la destilación del petróleo que proporcionan consistencia, aglutinación y ductilidad a las mezclas asfálticas. A temperatura ambiente se encuentran en estado sólido o semisólido, por lo que para ser utilizado en estado líquido requiere de un calentamiento previo a elevadas temperaturas.

Dentro de estos ligantes existen los *betunes asfálticos*, *betunes fluidificados o fluxados*, *emulsiones bituminosas* y *ligantes modificados*.

Los betunes asfálticos son subproductos de las refinerías de petróleo. Es un sistema coloidal tipo gel que a temperatura ambiente es sólido o semisólido, con lo cual requiere un calentamiento previo.

Los betunes fluidificados o fluxados son una disolución de betún asfáltico en un fluidificante. En el caso de los betunes fluidificados la disolución es en aceite o en un fluidificante derivado del petróleo. En los betunes fluxados el fluidificante no es derivado del petróleo, sino que procede de la destilación de la hulla.

Las emulsiones bituminosas son dispersiones coloidales de betún asfáltico en agua. A temperatura ambiente son líquidas.

Los ligantes modificados son ligantes hidrocarbonados a los que se añaden aditivos para modificar la reología de la mezcla.

Para este proyecto, se empleará betún modificado con polímeros, cuyo nombre técnico es " *Olexobit MF (BM-3C)* ". Por ello se comenta a continuación un breve apartado sobre éstos, resaltando el por qué de su utilización actualmente.

3.2.2.1.1 Ligantes modificados

Aunque con los productos ya vistos se cubren la práctica totalidad de necesidades que pueden surgir en la construcción de carreteras, existen situaciones en las que el ligante debe ofrecer una mejor respuesta: grandes cargas de tráfico, condiciones externas agresivas, gran variabilidad térmica, etc. Los ligantes modificados surgen para tratar de cubrir este hueco. Con ellos se pretende mejorar ciertas características con respecto a los betunes convencionales, como la susceptibilidad térmica, reología, comportamiento mecánico y fluencia, adhesividad pasiva, resistencia al envejecimiento o una mayor durabilidad. La composición de este tipo de productos tiene como ingrediente básico un betún de penetración o una emulsión bituminosa, al que se le incorporan aditivos de diversa naturaleza que modifiquen ciertas propiedades.

La **inclusión de polímeros** aumenta el coste inicial del ligante, llegando a alcanzar hasta el doble de valor que otro convencional. Sin embargo, este sobrecoste queda ampliamente compensado a lo largo de la vida útil de la carretera, dado que este tipo de ligantes reduce las operaciones de mantenimiento y **alarga la vida de servicio del pavimento**. Además, con los ligantes modificados pueden ejecutarse capas de menores espesores que las ordinarias obteniendo unas prestaciones equivalentes, además de una reducción de costes.

En la siguiente imagen, se puede ver cómo se mejora la viscosidad en betunes modificados con polímeros, respecto a los convencionales, conforme aumenta la temperatura.

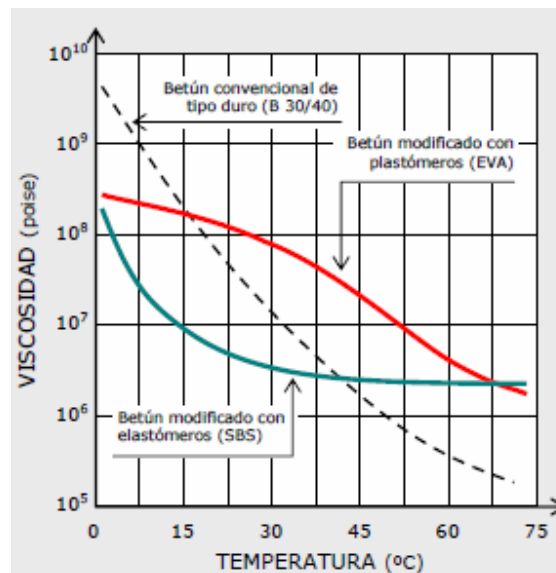


Imagen 10. Viscosidad en betunes convencionales y modificados con polímeros

3.2.2.2 Procedencia y obtención

Existen dos formas conocidas de procedencia de los betunes aptos para su empleo en carreteras:

(a) **Betunes naturales:** Proceden de la descomposición de organismos marinos, aflorando a la superficie en lagos de asfalto o impregnados en las rocas. Destaca por su importancia el "asfalto de Trinidad", que se extrae de un gran lago de asfalto existente en la isla del mismo nombre; posee más de un 50% de betún natural y tiene excelentes propiedades plásticas, resistentes e impermeabilizantes, por lo que se emplea en la pavimentación de vías.

(b) **Betunes artificiales:** Se obtienen como subproductos del **petróleo**, una mezcla de hidrocarburos con impurezas. Según sea la naturaleza del mismo se conseguirán betunes más o menos aptos para su empleo en carreteras.

La **obtención** de betunes asfálticos a partir de crudos del petróleo se realiza en las refinerías, empleándose para ello diversas técnicas y procesos industriales como la destilación, basadas en la separación de componentes del petróleo en base a su volatilidad. La figura de la página siguiente muestra un esquema de este proceso continuo de fraccionamiento, así como los productos que se obtienen del petróleo, entre ellos, los betunes asfálticos, que son los utilizados en este proyecto.

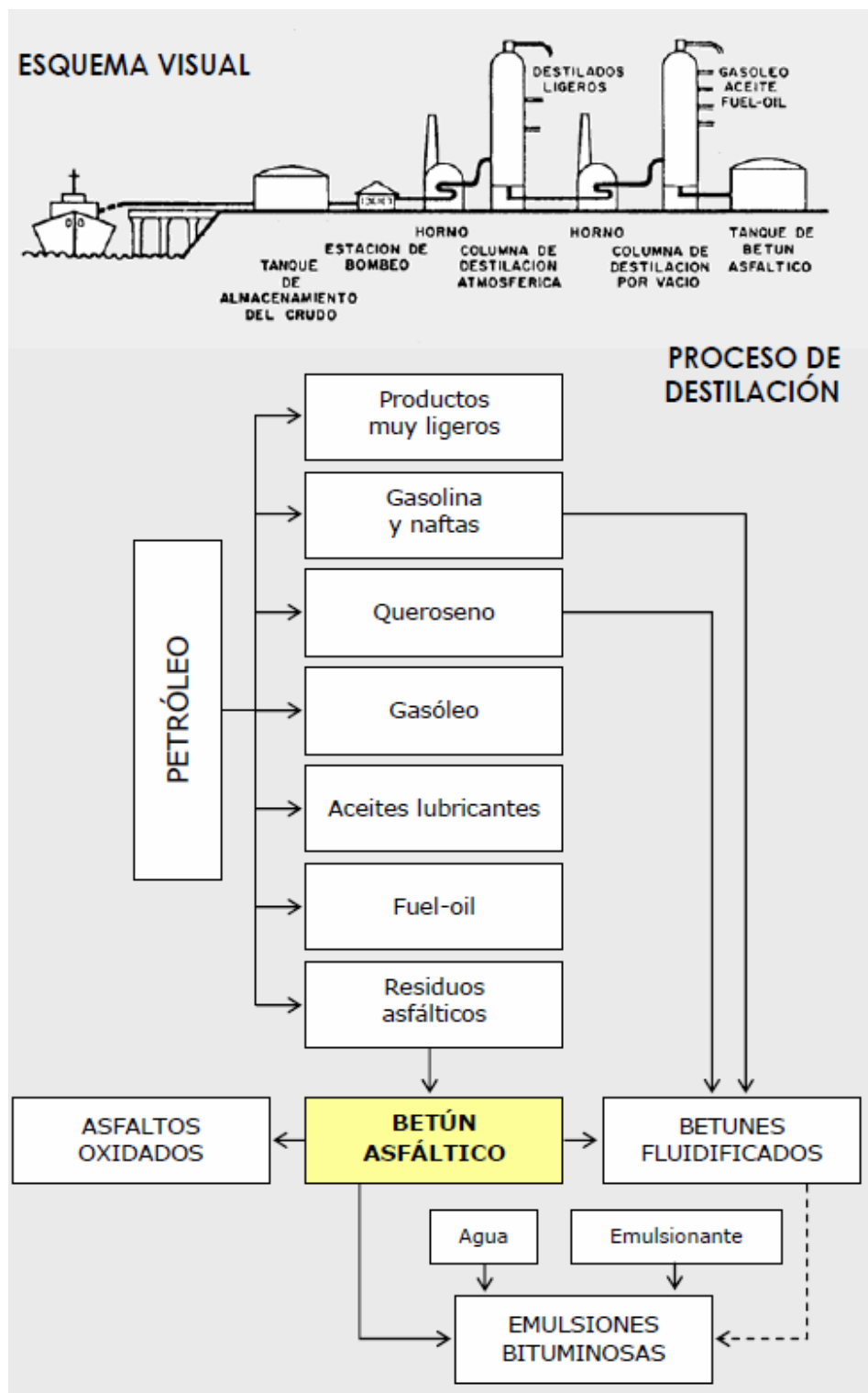


Imagen 11. Productos derivados del petróleo: obtención del betún asfáltico

3.2.2.3 Propiedades

En general, todos los betunes presentan una serie de características físicas comunes, tales como su color oscuro, la facultad de presentar buena adhesividad con la superficie de las partículas minerales o su inmiscibilidad con el agua.

En cuanto a su comportamiento mecánico, debe decirse que es muy complejo y que depende de varios factores, como son la sollicitación aplicada, el tiempo durante el que ésta actúa o la temperatura ambiente. Todo este complejo comportamiento trata de explicarse desde el punto de vista global de la reología.

Las propiedades más destacables de los betunes desde el punto de vista de la técnica de construcción de carreteras son las siguientes:

(a) **Adhesividad:** Facilidad que presenta el betún para adherirse a la superficie de una partícula mineral. Esta característica es muy importante en mezclas asfálticas, donde betún y áridos deben formar un conjunto homogéneo y continuo.

(b) **Viscosidad:** Se define como la resistencia que oponen las partículas a separarse, debido a los rozamientos internos que ocurren en el seno del fluido. En el caso de los betunes varía con la temperatura, lo que da una idea de su susceptibilidad térmica.

(c) **Susceptibilidad térmica:** Indica la propensión que presenta el betún a variar ciertas propiedades reológicas –especialmente la viscosidad- con la temperatura. Gracias a esta propiedad pueden manejarse con facilidad a altas temperaturas, presentando una mayor estabilidad a temperatura ambiente.

(d) **Plasticidad:** Define el comportamiento mecánico del betún ante diferentes estados físicos y temporales de carga. Un betún poco plástico no soportará deformaciones excesivas sin que se produzcan grietas .

(e) **Envejecimiento:** Fenómeno de degradación y transformación química de los componentes del betún debido a la acción oxidante del aire y la presencia de humedad y radiaciones solares, haciendo que el betún pierda sus propiedades reológicas y adhesivas.

En base a las propiedades anteriormente descritas, pueden establecerse las características que debería cumplir el **ligante ideal**:

1.- Debe ser **fluido** durante su puesta en obra para que sea trabajable y penetre en profundidad, recubriendo la superficie de los áridos y dándoles adherencia. Para ello se calienta a altas temperaturas, sin llegar a inflamarlo.

2.- Por el contrario, debe ser suficientemente **consistente** y **viscoso** a temperaturas ambiente altas, para que el firme sea poco deformable bajo la acción continuada de las cargas de tráfico, sin que presente fenómenos de fluencia.

3.- A bajas temperaturas debe presentar **flexibilidad**, para que el pavimento no se vuelva frágil y quebradizo, y trabaje de la forma como se ha ideado.

4.- La película de ligante debe tener un **espesor** suficiente para que el proceso de envejecimiento no le afecte en demasía.

3.3 Clasificación de las mezclas asfálticas

Dada la gran cantidad de parámetros que definen un aglomerado asfáltico, existen diversos criterios para efectuar su clasificación. El siguiente esquema hace un breve resumen de todos ellos, que serán analizados seguidamente:

Parámetro	Tipo de mezcla	Características
ÁRIDO EMPLEADO (ACUMULATIVA)	▪ Mástic	Filler + Betún
	▪ Mortero	Árido fino + Mástic
	▪ Macadam	Árido grueso + Betún
	▪ Hormigón	Árido grueso + Mortero
TEMPERATURA DE PUESTA EN OBRA	▪ En frío (MBF)	Temperatura ambiente
	▪ En caliente (MBC)	Altas temperaturas
% DE HUECOS EN MEZCLA (PG-4)	▪ Densas (D)	3 a 6%
	▪ Semidensas (S)	6 a 10%
	▪ Gruesas (G)	10 a 15%
	▪ Abiertas (A)	15 a 22%
	▪ Porosas (PA)	22 a 28%
TAMAÑO TEXTURA SUPERFICIAL	▪ Gruesas (gravas)	$T_{\text{máx}} > 8 \text{ mm}$
	▪ Finas (arenas)	$T_{\text{máx}} \leq 8 \text{ mm}$
GRANULOMETRÍA DE LOS ÁRIDOS	▪ Continuas	
	▪ Discontinuas	
ESTRUCTURA ESQUELETO MINERAL	▪ Sin esqueleto mineral	
	▪ Con esqueleto mineral	

Tabla 7. Clasificación de las mezclas asfálticas

3.3.1 Por el árido empleado

Se puede establecer una clasificación acumulativa en función de los tipos de árido que se van incorporando, obteniendo así cuatro clases de mezclas:

(a) **Mástic o mástico bituminoso**: Formado por una mezcla de polvo mineral o *filler* y un ligante hidrocarbonado, que suele ser betún de penetración.

(b) **Mortero bituminoso**: A la composición del mástic se le adiciona árido fino, es decir, arena de tamaño inferior a 8 mm., obteniendo esta nueva mezcla.

(c) **Macadam bituminoso**: Se obtiene mezclando árido grueso de granulometría uniforme (macadam) con un betún de penetración. También se denomina tarmacadam (tar = asfalto) y se empleaba antiguamente en estabilización de capas granulares.

(d) **Hormigón bituminoso**: Es el empleado usualmente en la construcción de capas bituminosas. Se obtiene adicionando árido grueso al mortero, por lo que está formado por tres tipos de materiales: árido grueso (grava), árido fino (arena) y betún.

3.3.2 Por la temperatura de puesta en obra

Existen, pues, dos tipos de mezclas según su temperatura de puesta en obra:

(a) **Mezclas bituminosas en frío (MBF)**: En ellas, el ligante suele ser una emulsión bituminosa –en algunos países se emplean betunes fluidificados-, de forma que la viscosidad es suficientemente baja como para no requerir un calentamiento previo a su puesta en obra.

(b) **Mezclas bituminosas en caliente (MBC)**: En este caso, el ligante utilizado para su confección es el betún de penetración, por lo que se necesita reducir su viscosidad calentándolo en obra a temperaturas que oscilan entre los 150 y los 200 °C. De este modo se logra una mayor trabajabilidad y docilidad del material.

3.3.3 Por el porcentaje de huecos en mezcla

La compacidad o la proporción de huecos que presente la mezcla influye de forma determinante en sus características mecánicas, reológicas e impermeables, por lo que es conveniente conocer las diferentes tipologías existentes y los usos recomendados. El PG-3 tipifica las siguientes clases de mezclas:

(a) **Mezclas densas (D)**: También denominadas cerradas. Su pequeño porcentaje de huecos (entre el 3 y el 6%) hace que su impermeabilidad sea muy alta, por lo que resguardan eficazmente del agua a las capas subyacentes. No suelen emplearse dada la alta cantidad de betún que requieren, debido a la gran superficie específica que poseen por su alto contenido en filler.

(b) **Mezclas semidensas (S)**: Son similares a las anteriores sólo que el porcentaje de huecos es algo menor (6 a 10%). Al tener un menor contenido en finos permiten una menor dosificación de ligante con el consiguiente ahorro económico. Son las más empleadas en capas de rodadura de carreteras y pavimentación urbana.

(c) **Mezclas gruesas (G)**: La curva granulométrica de los áridos que forman este tipo de mezclas se aleja de la máxima compacidad, empleando menores cantidades de *filler*, lo que conlleva una menor cantidad de ligante. Su carencia de impermeabilidad hace que este tipo de mezclas sean idóneas para su empleo en capas intermedias o de base, dado que aunque tienen menor calidad que las anteriores son más económicas.

(d) **Mezclas abiertas (A)**: Su elevado porcentaje de huecos y su práctica carencia de elementos finos hace que su índice de huecos sea muy alto (entre el 15 y el 20%). Resisten más por el rozamiento interno de las partículas que por cohesión, presentando una baja impermeabilidad. Se emplean en capas de base (tarmacadam).

(e) **Mezclas porosas o drenantes (PA)**: Últimamente han adquirido una gran importancia en la pavimentación de firmes, ya que ofrecen una serie de propiedades muy ventajosas desde el punto de vista de la evacuación de aguas –mayor adherencia y seguridad- o la generación de ruido de rodadura. Lógicamente permiten el paso del agua en su interior, por lo que la capa inferior debe presentar características impermeables (mezcla densa o semidensa).

3.3.4 Por el tamaño máximo de los áridos

En función del tamaño máximo del árido empleado –arenas o gravas- cabe distinguir entre las siguientes mezclas:

(a) **Mezclas de textura fina**: En este tipo de mezclas, el tamaño máximo de sus áridos no excede de 8 mm. Destacan las lechadas bituminosas o *slurrys* ya estudiadas con anterioridad y los microaglomerados en frío y en caliente, todos ellos tratamientos superficiales empleados en la rehabilitación de vías de cierta importancia.

(b) **Mezclas de textura gruesa**: Constituyen la gran mayoría de los aglomerados tipificados en España, empleando tamaños máximos de árido normalizados de 8, 12, 20 y 25 mm. Son los que definen una mejor macrotextura del firme y determinan sus principales propiedades superficiales.

3.3.5 Por la granulometría de los áridos

La distribución de tamaños en los áridos empleados condiciona las características de la mezcla bituminosa, estableciendo a su vez una división en dos grandes familias:

(a) **Mezclas continuas**: Existe una distribución escalonada de tamaños de árido, de forma que las partículas más finas rellenan los huecos dejados entre las más gruesas. Este tipo de granulometrías es típica de las mezclas cerradas, caracterizadas por un alto contenido en filler. Se emplean de forma generalizada en nuestro país.

(b) **Mezclas discontinuas**: Su granulometría es discontinua, faltando áridos de tamaños comprendidos entre 2 y 8 mm. Son mezclas relativamente impermeables, aunque con peor comportamiento plástico y más caras. Destacan los macadams, cuya granulometría es uniforme. Este tipo de mezclas en caliente, son el objeto esencial de estudio del presente proyecto, por ello se les dedica más atención en el siguiente capítulo.

3.3.6 Por la estructura del árido

Según la estructura y ordenación interna que presentan las partículas se distinguen dos tipos de mezclas:

(a) **Mezclas sin esqueleto mineral**: Se trata de compuestos con un elevado contenido en filler –y por consiguiente de betún-, lo que hace que trabajen únicamente por cohesión al estar dispersos los áridos en el ligante, sin trabazón alguna.

(b) **Mezclas con esqueleto mineral**: Entre ellas se engloban los hormigones y morteros bituminosos, por lo que son las más empleadas en casi todos los países. Se adaptan a cualquier situación de carga y son más económicas que las anteriores, dado que su contenido en ligante es más reducido. Las mezclas normalizadas en España pertenecen exclusivamente a este grupo.

Capítulo 4: Mezclas bituminosas en caliente discontinúas para capas de rodadura

4.1 Definición

Se define como mezcla bituminosa discontinua en caliente (MBC) para capas de rodadura, aquélla cuyos materiales son la combinación de un ligante hidrocarbonado, áridos que presentan una discontinuidad granulométrica muy acentuada en los tamices inferiores del árido grueso, 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 obliga a 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.

En España se normalizaron dos tipos de mezclas discontinuas, las mezclas tipo F (capas finas), con espesores entre los 2,0 y 3,5 cm; y las tipo M (monogranulares), más finas y extendidas en capas entre 1,0 y 2,0 cm de espesor. En ambas, los tamaños máximos utilizados son 8,0 y 10,0 mm. Se caracterizan por tener un elevado contenido de árido grueso (70-85%), que asegura un buen rozamiento interno. Otra característica importante es que la cantidad de filler o polvo es elevada, necesitando comúnmente filler de aportación.

Como se ha explicado en el capítulo anterior, constan de áridos (grueso, fino y filler) y ligante. A continuación se verá qué características en concreto deben tener estos componentes, para este tipo de mezclas en especial. Para ello se hará referencia a la normativa vigente explícita para este tipo de mezclas en el pliego del PG-3. Así mismo, se prestará especial atención a las mezclas tipo M.

4.2 Materiales y criterios de diseño

4.2.1 Ligante hidrocarbonado

El Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares fijará el tipo de ligante hidrocarbonado a emplear, que será seleccionado, en función de la categoría de tráfico pesado, definida en la Norma 6.1 IC de Secciones de firme o en la Norma 6.3 IC de Rehabilitación de firmes. Los tipos de ligante empleados pues, se recogen en la siguiente tabla:

CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO		
T00 y T0	T1	T2 a T4 y arcenes
BM-3c	BM-3c o BM-3b	B60/70 o B80/100

Tabla 8. Elección del ligante en función de la categoría de tráfico

En este proyecto, se empleará un BM-3c, de nombre técnico " Olexobit MF", pues se quiere analizar este tipo de mezclas en las condiciones de tráfico más restrictivas, esto es, la T00. Destacar por ello en todas las tablas que se explicarán en este capítulo, que hay que fijarse en los parámetros referentes a una condición de tráfico T00.

La estructura del firme, depende, entre otros factores, de la acción del tráfico, fundamentalmente del tráfico pesado, durante el período de proyecto del firme. Por ello, la sección estructural del firme dependerá en primer lugar de la intensidad media diaria de vehículos pesados (IMDp) que se prevea en el carril de proyecto en el año de puesta en servicio. Dicha intensidad se utilizará para establecer la categoría de tráfico pesado. Para ello la norma dicta ocho categorías de tráfico pesado, según sea la IMDp que se prevea para el carril. Dichas categorías se recogen en la tabla 9, en la que se puede apreciar que la T00 es la más restrictiva, pues presenta el IMDp más elevado.

Categoría tráfico pesado	IMDp
T00	4000
T0	2000-3999
T1	800-1999
T2	200-799
T31	100-199
T32	50-99
T41	25-49
T42	<25

Tabla 9. Categorías de tráfico pesado que clasifica el PG-3

A continuación, se resumen las propiedades de este tipo de ligante empleado en la realización de este proyecto, mediante su ficha técnica obtenida en la página web del grupo *British Petroleum* (www.bp.com) .

CARACTERÍSTICA	UNIDAD	NORMA NLT	OLEXOBIT MF
BETÚN ORIGINAL			
PENETRACIÓN (25 °C; 100 g; 5 s)	0.1 mm.	124	65
Pto. DE REBLANDECIMIENTO (A y B)	°C	125	78
Pto. DE FRAGILIDAD FRAAS	°C	182	-21
Intervalo de plasticidad			99
FLOTADOR (60 °C)	s	183	>3000
ESTABILIDAD DE ALMACENAMIENTO			
Diferencia pto. de reblandecimiento	°C	328 y 125	< 5
Diferencia pto. Penetración (25 °C)	0.1 mm.	328 y 124	< 10
RECUPERACIÓN ELÁSTICA (25 °C; torsión)	%	329	90
CONTENIDO EN AGUA (en Volumen)	%	123	0
PUNTO D EINFLAMACIÓN v/a	°C	127	290
DENSIDAD RELATIVA (25 °C/25 °C)		122	1.023
RESIDUO DESPUÉS DE PELÍCULA FINA			
VARIACIÓN DE MASA	%	185	0.05
PENETRACIÓN (25 °C; 100 g; 5s)	% p.o.	124	75
VARIACIÓN DEL PUNTO DE REBLANDEC.	°C	125	1
DUCTILIDAD (5 °C; 5 cm./min.)	cm.	126	16

Tabla 10. Características técnicas del ligante empleado en el proyecto

4.2.2 Áridos

4.2.2.1 Características generales

Los áridos a emplear en las mezclas bituminosas discontinuas en caliente podrán ser naturales o artificiales, siempre que cumplan las especificaciones recogidas en la norma del PG-3.

Los áridos se producirán o suministrarán en fracciones granulométricas diferenciadas, que se acopiarán y manejarán por separado hasta su introducción en las tolvas en frío.

Los áridos no serán susceptibles de ningún tipo de meteorización o alteración físico-química apreciable bajo las condiciones más desfavorables que, presumiblemente, puedan darse en la zona de empleo. Tampoco podrán dar origen, con el agua, a disoluciones que puedan causar daños a estructuras u otras capas del firme, o contaminar corrientes de agua.

Debido a que los áridos se recogen directamente de la planta de selección de áridos de la empresa MLN no ha sido necesario realizar los ensayos pertinentes sobre cada uno de ellos, ya que en dicha planta se realizan de manera periódica.

4.2.2.2 Árido grueso

Se define como árido grueso la parte del árido total retenida en el tamiz 2 mm de la UNE-EN 933-2. A continuación, se verá qué propiedades, de las descritas en el capítulo anterior, se le exigen para las mezclas bituminosas discontinuas en caliente:

Angulosidad del árido grueso (Partículas trituradas)

La proporción de partículas trituradas del árido grueso, según la UNE-EN 933-5, deberá cumplir lo fijado en la tabla 11 :

CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO	
T00 a T2	T3, T4 y arcenes
100	≥ 75

Tabla 11. Proporción de partículas trituradas del árido grueso

Forma del árido grueso (Índice de lasjas)

El índice de lasjas de las distintas fracciones del árido grueso, según la UNE-EN 933-3, deberá cumplir lo fijado en la tabla 12:

CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO	
T00 a T2	T3, T4 y arcenes
≤ 20	≤ 25

Tabla 12. Índice de lasjas del árido grueso

Resistencia a la fragmentación del árido grueso (Coeficiente Los Ángeles)

El coeficiente de Los Ángeles del árido grueso, según la UNE-EN 1097-2, deberá cumplir lo fijado en la tabla 13:

TIPO DE MEZCLA	CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO	
	T00 a T2	T3, T4 y arcenes
F	≤ 20	≤ 25
M	≤ 15	≤ 25

Tabla 13. Coeficiente de los Ángeles del árido grueso

En nuestro caso, hay que fijarse en la mezcla M con la condición T00.

Resistencia al pulimento del árido grueso (Coeficiente de pulimento acelerado)

El coeficiente de pulimento acelerado del árido grueso, según el anexo D de la UNE 146130, deberá cumplir lo fijado en la tabla 14:

CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO		
T00	T0 a T2	T3, T4 y arcenes
$\geq 0,55$	$\geq 0,50$	$\geq 0,45$

Tabla 14. Coeficiente de pulimento acelerado del árido grueso

Limpieza del árido grueso (Contenido de impurezas)

El árido grueso deberá estar exento de terrones de arcilla, materia vegetal, marga u otras materias extrañas que puedan afectar a la durabilidad de la capa.

El contenido de impurezas, según el anexo C de la UNE 146130, del árido grueso deberá ser inferior al cinco por mil (0,5%); en caso contrario, el Director de las Obras podrá exigir su limpieza por otros métodos, tales como lavado o aspiración.

4.2.2.3 Árido fino

Se define como árido fino la parte del árido total cernida por el tamiz 2 mm y retenida por el tamiz 0,063 mm de la UNE-EN 933-2.

El árido fino deberá proceder de la trituración de piedra de cantera o grava natural en su totalidad, o en parte de yacimientos naturales.

El árido fino deberá estar exento de terrones de arcilla, materia vegetal, marga u otras materias extrañas.

Resistencia a la fragmentación del árido fino

Cuando el material que se triture para obtener árido fino sea de la misma naturaleza que el árido grueso, deberá cumplir las condiciones exigidas sobre el coeficiente de Los Ángeles.

Se podrá emplear árido fino de otra naturaleza que mejore alguna característica, en especial la adhesividad, pero en cualquier caso procederá de árido grueso con coeficiente de Los Ángeles inferior a veinticinco.

4.2.2.4 Polvo mineral

Se define como polvo mineral la parte del árido total cernida por el tamiz 0,063 mm de la UNE-EN 933-2.

El polvo mineral podrá proceder de los áridos, separándose de ellos por extracción en la central de fabricación, o bien aportarse a la mezcla por separado de aquellos, como un producto comercial o especialmente preparado.

En el presente estudio, se empleará cuatro tipos de polvo mineral o filler : filler proveniente de árido silicio, filler calizo, filler cemento y otro tipo de filler obtenido de un residuo orgánico, mediante incineración de lodos de depuradora.

La proporción de polvo mineral de aportación a emplear en la mezcla deberá cumplir lo fijado en la tabla 15:

CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO	
T00 a T2	T3, T4 y arcenes
100	≥ 50

Tabla 15. Proporción del polvo mineral de aportación (% en masa del resto del polvo mineral, excluido el inevitablemente adherido a los áridos)

El polvo mineral que quede inevitablemente adherido a los áridos, tras su paso por el secador, en ningún caso el 2% de la masa de la mezcla.

Por último, destacar que la densidad aparente del polvo mineral, según la NLT-176, deberá estar comprendida entre cinco y ocho decigramos por centímetro cúbico (0,5 a 0,8 g/cm³).

4.3 Tipo y composición de la mezcla

La granulometría del árido obtenido combinando las distintas fracciones de los áridos (incluido el polvo mineral), según el tipo de mezcla, deberá estar comprendida dentro de alguno de los husos fijados en la tabla 16. El análisis granulométrico se hará según la UNE-EN 933-1. En este proyecto, se utilizará la mezcla M10.

TIPO DE MEZCLA	ABERTURA DE LOS TAMICES (mm)						
	12,5	10	8	4	2	0,500	0,063
M8	-	100	75-97	14-27	11-22	8-16	5-7
M10	100	75-97	-	14-27	11-22	8-16	5-7
F8	-	100	75-97	23-38	18-32	11-23	7-9
F10	100	75-97	-	23-38	18-32	11-23	7-9

(*) La fracción del árido que pasa por el tamiz 4 mm de la UNE-EN 933-2 y es retenida por el tamiz 2 mm de la UNE-EN 933-2, será inferior al ocho por ciento (8%).

Tabla 16. Husos granulométricos. Cernido acumulado (% en masa)

Destacar que los valores que aparecen en esta tabla, delimitan los valores máximos y mínimos de porcentaje de pase de árido por cada tamiz.

Para carreteras con categoría de tráfico pesado T00 a T1 se emplearán las mezclas bituminosas discontinuas en caliente tipo M.

El Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares fijará el tipo, composición y dotación de la mezcla bituminosa discontinua en caliente que deberá cumplir lo indicado en la tabla 17 :

CARACTERÍSTICA		TIPO DE MEZCLA			
		M8	M10	F8	F10
DOTACIÓN MEDIA DE MEZCLA (kg/m ²)		35-50	55-70	40-55	65-80
DOTACIÓN MINIMA(*) DE LIGANTE (% en masa sobre el total del árido seco, incluido el polvo mineral)		5		5,5	
LIGANTE RESIDUAL EN RIEGO DE ADHERENCIA (kg/m ²)	Firme nuevo	> 0,3		> 0,25	
	Firme antiguo	> 0,4		> 0,35	

(*) Incluidas las tolerancias especificadas en el apartado 543.9.3.1. Se tendrán en cuenta las correcciones por peso específico y absorción de los áridos, si son necesarias.

Tabla 17. Tipo, composición y dotación de la mezcla

Salvo justificación en contrario, la relación ponderal recomendable entre los contenidos de polvo mineral y ligante hidrocarbonado determinada en la fórmula de trabajo, según el tipo de mezcla, deberá estar comprendida en los siguientes intervalos:

- Entre trece y diecisiete décimas (1,3 a 1,7) para las mezclas tipo F.
- Entre once y trece décimas (1,1 a 1,3) para las mezclas tipo M.

4.4 Parámetros de análisis

Dentro de este capítulo se ha visto que este tipo de mezclas se dividen en dos grandes grupos: las de tipo F, y las de tipo M. El uso de ambas persigue el mismo objetivo: buscar el equilibrio óptimo entre resistencia y permeabilidad, para su uso en capas de rodadura. Pero la forma de analizar cada una de ellas es distinta, según indica la norma en el PG-3. Las mezclas *tipo F*, se rigen por el ensayo Marshall, en el que se analiza la estabilidad-deformación de las mezclas. Las mezclas *tipo M*, se rigen por el ensayo de pérdida de desgaste, conocido como ensayo Cántabro.

En el caso de mezclas bituminosas de **tipo F**, se debe cumplir la siguiente tabla:

CARACTERÍSTICA	VALOR
Nº de golpes por cara	50
Estabilidad (kN)	> 7,5
Huecos en mezcla (%)	> 4

Tabla 18. Criterios de dosificación de mezclas tipo F con el ensayo Marshall

En el caso de las mezclas bituminosas discontinuas **tipo M** el análisis de huecos y la pérdida por abrasión en el ensayo cántabro, según la NLT-352, cumplirán los valores especificados en la tabla 19.

CARACTERÍSTICA	VALOR
Número de golpes por capa	50
Pérdida por abrasión en seco (%)	≤ 15
Huecos en mezcla (%)	≥ 12

Tabla 19. Criterios de dosificación de mezclas tipo M con el ensayo Cántabro

La temperatura de fabricación de la mezcla deberá corresponder, en principio, a una viscosidad del ligante hidrocarbonado comprendida entre ciento cincuenta y ciento noventa centistokes (150 y 190 cSt).

En cualquier circunstancia se comprobará la adhesividad árido-ligante mediante la caracterización de la acción del agua. Para ello, en mezclas bituminosas discontinuas **tipo F**, la pérdida de resistencia en el ensayo de inmersión-compresión, según la NLT-162, no rebasará el veinticinco por ciento y, en mezclas **tipo M**, la pérdida por abrasión en el ensayo cántabro, según la NLT-352, tras ser sometidas a un proceso de inmersión en agua durante un día a sesenta grados, no rebasará el veinticinco por ciento. Muy importantes son estos valores a la hora de analizar resultados.

4.5 Ventajas de uso respecto a las mezclas tradicionales

Las principales características de estas mezclas, que las destacan respecto de las mezclas asfálticas tradicionales, según la experiencia española de los últimos años, se pueden resumir en los siguientes puntos:

1.- Mejores condiciones de seguridad, dadas por su macro-rugosidad, que ofrecen al usuario del camino una superficie muy segura tanto a altas como bajas velocidades; buena drenabilidad superficial en tiempo de lluvia, que impide la formación de una película de agua continua cuando las precipitaciones no son muy altas, y excelente comportamiento frente al deslizamiento.

2.- Excelente sensación de confort, debido a su baja sonoridad y mejora de la regularidad de la textura. La sonoridad es una característica que ha adquirido cada vez más importancia, ya que se traduce en un importante factor de seguridad. Al utilizar estas mezclas se reduce el ruido de rodadura entre 1,5 y 2,0 dB en pavimento seco y entre 2,0 y 4,0 dB en pavimento mojado, respecto de las tradicionales capas de rodadura.

3.- Mayor durabilidad por presentar una muy buena resistencia al envejecimiento y excelente comportamiento a la deformación y a la fisuración, debido al tipo y elevado contenido de ligante, traducándose esto en la conservación de sus características mecánicas en un amplio intervalo de temperatura.

Capítulo 5: Ensayos experimentales.

Resultados y conclusiones.

5.1 Metodología

La metodología usada para la realización de los ensayos, es la denominada metodología Marshall (NLT-159), establecida por el PG-3, la cual se describe a continuación paso por paso a lo largo de este capítulo.

5.1.1 Selección granulométrica y fórmula de trabajo

Como se explicó en el capítulo 4, el objetivo de esta selección granulométrica es el de obtener la dosificación o fórmula de trabajo correcta para las probetas. Esto se consigue tras un meticuloso proceso de tamizado de las distintas fracciones de árido, sujeto siempre a cumplir la norma del PG-3 en cuanto a husos granulométricos. Se recuerda que para una M10 es el siguiente:

TIPO DE MEZCLA	ABERTURA DE LOS TAMICES (mm)						
	12,5	10	8	4	2	0,500	0,063
M8	-	100	75-97	14-27	11-22	8-16	5-7
M10	100	75-97	-	14-27	11-22	8-16	5-7
F8	-	100	75-97	23-38	18-32	11-23	7-9
F10	100	75-97	-	23-38	18-32	11-23	7-9

(*) La fracción del árido que pasa por el tamiz 4 mm de la UNE-EN 933-2 y es retenida por el tamiz 2 mm de la UNE-EN 933-2, será inferior al ocho por ciento (8%).

Tabla 20. Husos granulométricos para mezcla M10

Conocidos esos husos, la fórmula de trabajo elegida ha sido la recomendada por la empresa MLN y calculada mediante una hoja Excel. En dicha hoja de cálculo, se introducen los valores máximos y mínimos de cada huso granulométrico, acotando así el resultado a obtener tras hacer la granulometría, mediante el porcentaje de pase de árido por cada tamiz normalizado. Destacar que los valores que salgan tras realizar la granulometría, deben estar siempre dentro de esos límites. Bajo ningún concepto se admitirá valores fuera de los mismos. Para aproximarse al resultado óptimo, se intenta ajustar los valores reales que salen tras realizar la granulometría combinada de árido 0/6 y 6/12 mm (en su correspondiente muestra representativa), respecto al valor medio entre el límite máximo y mínimo del pase por cada tamiz. Así pues, los cálculos y la gráfica obtenida son los que se indican en la tabla 21 e imagen 12, respectivamente:

TAMIZ	ORDENADA		HUSO	
UNE	COMBINADA		M-10 (O.C 5/2001)	
		<i>Máx.</i>	<i>Medio</i>	<i>Mín.</i>
12.5	100	100	100	100
10	87.2099	97	86	75
4	23.067225	27	20.5	14
2	17.68297	22	16.5	11
0.5	11.770785	16	12	8
0.063	6.309175	7	6	5

Tabla 21. Porcentaje de pase de árido en la mezcla M10 obtenido en laboratorio

En la tabla se puede apreciar los valores máximos y mínimos de huso para la M10 que dicta el PG-3, así como el *valor medio orientativo* de pase por cada tamiz. En la columna "combinada" se aprecia los resultados reales, tras ajustarlos a dicho valor medio. La imagen 12 presenta los resultados de forma gráfica, lo que facilita su comprensión:

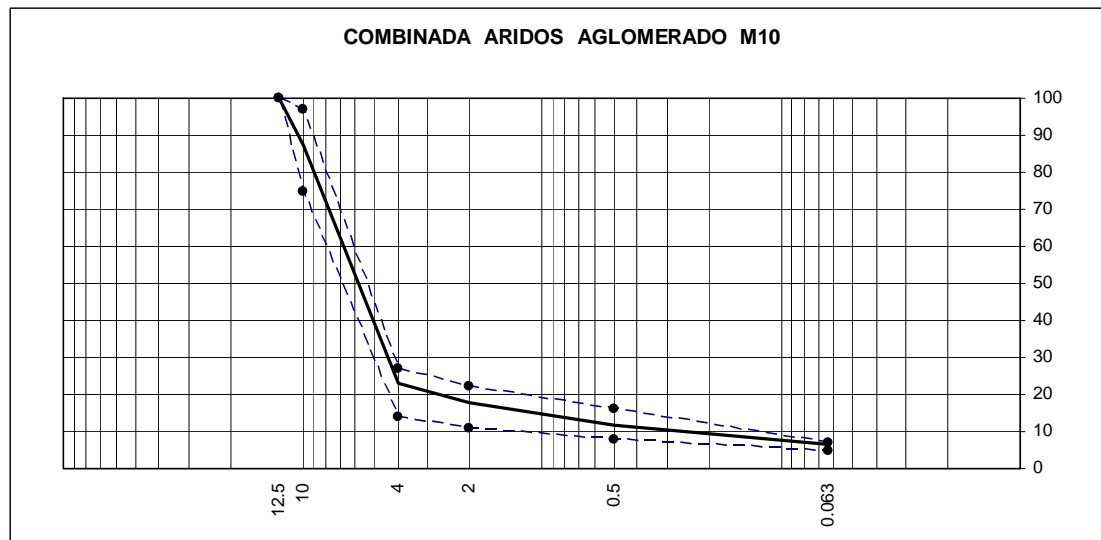


Imagen 12. Curva granulométrica obtenida en la M10

Se puede apreciar claramente que la gráfica obtenida encaja perfectamente dentro de los límites que dicta la norma. También se puede ver el cambio de pendiente que presenta, fruto de una mezcla abierta.

Conocido esto, y gracias a la experiencia de la empresa, se determina la siguiente fórmula de trabajo:

Componente	Porcentaje	Cantidad
árido 0/6 mm	16%	173 gr
árido 6/12 mm	74.20%	803 gr
filler aportación	5%	54 gr
Betún	4.80%	52 gr
		total = 1082 gr/probeta

Tabla 22. Fórmula de trabajo

Se puede apreciar que el tanto por ciento de árido 6/12 es mucho mayor que el de la arena (árido 0/6), esto se debe a que la mezcla es abierta, como se ha explicado en capítulos anteriores.

Destacar también que la proporción inicial teórica para estas mezclas es de 80-20 %, aproximadamente, respecto a porcentaje de árido grueso y fino. Y el porcentaje mínimo de ligante en capas de rodadura es del 4.5 %. Gracias a la experiencia de la empresa se puede afinar más esos valores hasta obtener el expuesto en la tabla anterior para obtener la dosificación perfecta para las M10.

Otro parámetro a destacar es cómo saber cuánto tiene que pesar cada probeta. Relacionado con el párrafo anterior, hay que ir probando. Es decir, se parte por experiencia de la empresa de una masa para cada probeta, y se le aplica esa dosificación. Tras su realización y compactación, hay que ver que esa probeta cumple con la norma. Para ello hay que analizar su densidad o, equivalentemente, las dimensiones de la probeta, que tienen que estar dentro de unos valores para ser aptas. Para ello se toma como referencia el valor de la altura media de la probeta, y en función de si se queda más o menos justa, se ve qué parámetros hay que ir modificando de la fórmula de trabajo. Tras varios intentos, la dosificación correcta es la de la tabla anterior, para una masa de 1082 gr para cada probeta, pues garantizamos cumplir la norma en todo momento.

Por último, a modo de resumen, destacar que todos estos valores de dosificación de las mezclas a realizar en el presente proyecto, están sujetos a las determinaciones de la tabla 23:

<i>Tipo de mezcla</i>	M10
<i>Tipo de betún</i>	BM-3C (Olexobit MF)
<i>Tipo de tráfico</i>	T00
<i>Tipo de capa</i>	Rodadura drenante

Tabla 23. Determinaciones del proyecto

Además de estos parámetros, hay que considerar la zona térmica en la que se va a trabajar. En el presente estudio, Zaragoza se trata de una zona térmica estival "caliente", como se puede apreciar en la imagen 13.

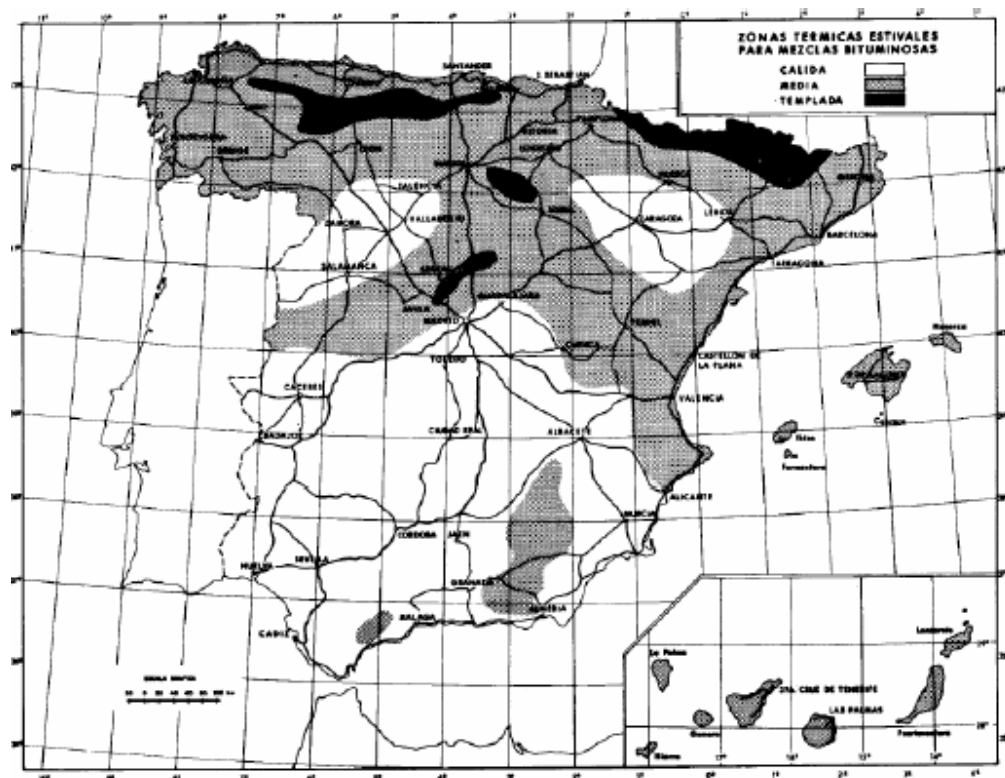


Imagen 13. Mapa de zonas térmicas estivales

5.1.2 Elección tipo de ligante

Este factor viene determinado por 3 parámetros: tipo de capa, zona térmica y categoría del tráfico.

La tabla que resume estos valores bajo la norma del PG-3, es la que se explicó en el capítulo 3.

Por tanto y como se explicó con detalle, el ligante usado en este proyecto será un betún modificado con polímeros: BM-3C.

5.1.3 Elección porcentaje de ligante

Existe una gran variedad de métodos encaminados a proyectar mezclas bituminosas que reúnan las propiedades adecuadas para su empleo en una determinada capa del firme, pudiendo establecerse dos grandes grupos:

- Métodos basados en al superficie específica.
- Métodos basados en ensayos mecánicos.

Destacar que en este proyecto, el tanto por ciento de ligante ha sido facilitado por experiencia de la empresa (partiendo del contenido mínimo impuesto por la norma), pues no hay que ir variando su dosificación y analizar su influencia en el comportamiento de las probetas. Como se dijo desde un principio, la proporción de todos los elementos de la M10 es constante, solo varía el tipo de filler (naturaleza) de aportación.

5.2 Realización de ensayos

Tras determinarse la fórmula de trabajo, se pasa a efectuar los ensayos requeridos, utilizando la metodología Marshall, la cual se desglosa paso por paso a continuación.

5.2.1 Preparación y realización de las probetas

En general, el número de probetas mínimo especificado por la norma a fabricar por cada tipo de mezcla es tres. Dicha imposición permite poder obtener tres resultados de cada mezcla, y así poder encontrar si se ha producido algún resultado muy disperso. En este proyecto, para cada mezcla con distinto tipo de filler, usaremos seis: tres para ensayo en seco, y otras tres para ensayo en húmedo.

Para realizar correctamente una probeta, se deberá de seguir los siguientes pasos:

1. Se introduce el bote de betún modificado en un horno y se espera hasta que la viscosidad del betún disminuya hasta unos valores que permitan manejarlo con facilidad. La temperatura del horno se fijará sobre 170°C. En la figura se muestra la imagen del horno utilizado:



Imagen 14. Horno empleado en el laboratorio

2. Se preparan los áridos de la mezcla en una bandeja. Consiste básicamente en la colocación de la bandeja sobre una báscula (precisión = 0,01 kg), se tara y se añade la fracción correspondiente de la mezcla total de un árido de determinada granulometría. Después se sigue pesando sucesivamente las cantidades de cada una de las fracciones de tal modo que se van añadiendo los de áridos de diferente granulometría que faltan para completar la fórmula de trabajo. Destacar que el filler va a parte.

Se puede apreciar lo anteriormente comentado en las siguientes imágenes:



Imagen 15. Báscula de precisión



Imagen 16. Bandejas con contenido de áridos, para 3 probetas. El filler se puede apreciar que va a parte (bandejas superiores).

3. Cuando se tiene la mezcla con los porcentajes de cada componente correcto, se introduce al horno. El árido no puede tener una temperatura mayor a 15°C respecto al ligante. Es suficiente con introducirlo 30 min antes del comienzo de la mezcla.

4. Además, previamente a la realización de la mezcla, también debe de introducirse en el horno todos componentes que se vayan a usar en el mezclado para que no se produzca una disminución en la temperatura (collar, placa base, molde y espátula).

A continuación, se adjunta la imagen 17 que engloba los pasos 3 y 4: todo el material necesario a calentar en el horno almacenado por separado.



Imagen 17. Todo el material necesario dentro del horno

Se puede apreciar como en la parte superior, se encuentra el betún y los moldes; en la parte media el filler de aportación; y en la parte inferior los áridos en distintas bandejas, cada una de ellas conteniendo las fracciones de árido 0/6 y 6/12 mezcladas, en su cantidad correcta determinada por la fórmula de trabajo.

5. Se enciende una placa eléctrica instantes antes de comenzar el mezclado. Sobre su base se coloca la cazuela, en la que se hará la mezcla para que se mantenga a la temperatura adecuada.



Imagen 18. Placa eléctrica y olla para cocinar

6. Se prepara en una bandeja a parte el contenido de filler determinado en la fórmula de trabajo. A continuación se muestran imágenes de los cuatro tipos de filler de aportación:



Imagen 19. Filler silicio



Imagen 20. Filler calizo



Imagen 21. Filler cemento



Imagen 22. Filler lodos depuradora

7. Cuando el betún alcanza una viscosidad baja, se saca la cazuela de la placa eléctrica (precalentamiento) y se coloca sobre la báscula. A continuación se vierten los áridos en el recipiente para el mezclado y se efectúa una mezcla ligera en seco de los mismos. Se forma un cráter en su centro y se añade por pesada la cantidad exacta de ligante calculada para la mezcla.

8. Vertido el porcentaje de ligante deseado, se traslada la cazuela sobre la placa eléctrica y se inicia el proceso de mezclado mediante una cuchara hasta que la mezcla quede homogéneamente cubierta. Durante el mezclado se debe controlar la temperatura de la mezcla para controla que esta dentro de los límites especificados.

9. A continuación se vierte el filler y se vuelve a remover hasta que la mezcla sea homogénea.

10. Se monta el conjunto de compactación que consiste en una placa base, sobre lo que se encaja el molde (tiene asa para poder ser manejable) y encima se coloca el collar (esta elongación permite que la mezcla no se salga al verterla sobre el molde). Cuando está montado correctamente, se coloca un papel de filtro circular, del diámetro del molde en su fondo y se vierte sobre él la mezcla recién fabricada, evitando las segregaciones del material. Es necesario que la mezcla se distribuya bien mediante la espátula caliente por medio de 15 golpes efectuados es su periferia y 10 en su interior. Finalmente se alisa la superficie de la mezcla y se coloca otro papel de filtro circular.

A continuación se muestran dos imágenes: una con los componentes por separado, y otra con el conjunto ensamblado.

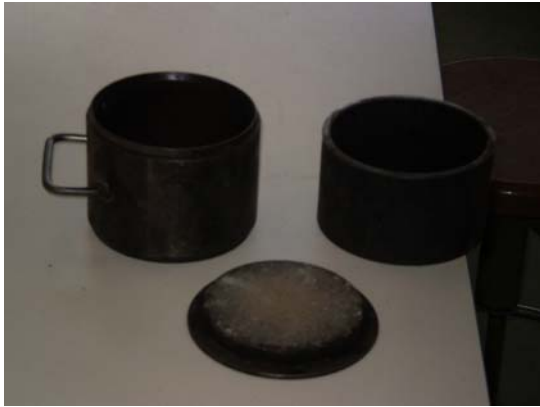


Imagen 23. Molde, placa base y collar



Imagen 24. Conjunto ensamblado

11. Antes de que se realice la compactación se debe de medir la temperatura de la mezcla con un termómetro, para ver si está entre los límites establecidos (140-150 °C).

12. Se desplaza el conjunto de compactación a la máquina de compactar donde se ajusta correctamente. Mediante el empleo de una maza, se da 50 golpes sobre una cara de la probeta, e inmediatamente se desmonta el collar, se invierte el molde y, fijado de nuevo el conjunto de compactación, se aplica igual número de golpes sobre la otra cara de la probeta.

A continuación se muestran dos imágenes: una el conjunto de compactación insertado dentro del resorte de la máquina, y otra en la que se ve la máquina de compactación.



Imagen 25. Ajuste del conjunto de compactación en los resortes de la máquina de compactación



Imagen 26. Máquina de compactación

13. Una vez compactada la probeta se extrae de la máquina de compactar y ya se puede retirar la placa base y el collar, quedando sólo el molde al cual también se le quita los papeles de filtro. Presentando el siguiente aspecto:



Imagen 27. Aspecto probetas recién compactadas

14. Para terminar, se debe esperar un tiempo mínimo de 4 horas antes de poder ser desmoldada. Para esta operación, se sustituye la placa base por el disco extractor y se fuerza suavemente la probeta para que pase desde el molde al collar (colocado de nuevo), con ayuda del mecanismo de extracción. Una vez que se extrae, se coloca la probeta cuidadosamente sobre una superficie plana, limpia y en un lugar fresco, hasta el momento del ensayo. Se debe de dejar pasar un tiempo mínimo de 24 horas.

Resaltar que el proceso de desmoldado se controla mediante un software instalado en el ordenador, el cual dirige el movimiento vertical de la prensa.

A continuación, se muestran tres imágenes para explicar este paso:



Imagen 28. Máquina desmoldadora



Imagen 29. Precisión en el ajuste para desmoldar, empleando el disco extractor



Imagen 30. Aspecto de probetas después de desmoldar

5.2.2 Densidad y análisis de porcentaje de huecos en la mezcla

Una vez desmoldadas las probetas, se determina su densidad y contenido en huecos a partir de la medida geométrica de su volumen y densidad relativa de los materiales. A continuación se explica cómo se debe realizar el ensayo para determinar correctamente la densidad y huecos en una mezcla, según la norma NLT-168.

Los porcentajes de huecos que se determinan en esta norma, huecos en mezcla, huecos en áridos y huecos rellenos de ligante, se calculan a partir de las proporciones en que intervienen en la mezcla los distintos componentes, áridos, polvo mineral y ligante, y sus respectivas densidades relativas obtenidas según la norma NLT-167.

En esta norma se describen tres procedimientos para la determinación de la densidad relativa. El primero es de aplicación general para todas las mezclas, el segundo solo se puede aplicar para mezclas cerradas y el tercero es para mezclas abiertas o porosas. En el caso de este proyecto se ha usado el tercer procedimiento, que consiste en determinar el volumen de la mezcla por medida geométrica de la probeta, pues es el indicado para mezclas muy abiertas o porosas.

5.2.2.1 Cálculo de densidad relativa

PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

Las muestras pueden ser probetas fabricadas en moldes o testigos extraídos de un pavimento. En todos los casos, se deben tomar las precauciones necesarias para evitar cualquier deformación, agrietamiento o deterioro en las muestras que pueden alterar las condiciones iniciales del material.

Dichas probetas cilíndricas, deberán tener un diámetro de 101.6 ± 0.1 mm, y una altura de 63.5 ± 2.5 mm, según se exige en la NLT-159.

PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO

Después de mantener la muestra al aire a temperatura ambiente una hora como mínimo, se pesa la misma con precisión de $\pm 0,1$ g, para obtener su masa. Se designa este valor por “A”.

A continuación se pasa a determinar el volumen de la muestra. Las probetas que se han utilizado son cilíndricas por lo que se explica la manera de determinarlo para esta geometría en concreto. Con el pie de rey o calibrador se efectúan cuatro medidas ($\pm 0,1$ mm), según los planos de dos diámetros perpendiculares, de la altura de la muestra. Se promedian los cuatro valores obtenidos y se designa el resultado por “h”. Como diámetro de la muestra se toma el valor del diámetro nominal del molde en que se fabricó la probeta (101,6 mm). Se designa por “d”.

Explicado el procedimiento de medición, la densidad relativa aparente determinada por medida geométrica del volumen de la muestra, se calcula aplicando la expresión siguiente:

$$\text{Densidad relativa aparente} = \frac{A}{\pi * \left(\frac{d}{2}\right)^2 * h}$$

donde:

A = masa en g de la muestra seca pesada en aire

d = diámetro de la muestra, en cm

h = altura de la muestra, en cm

5.2.2.2 Determinación de los huecos

El cálculo del contenido en huecos en este ensayo es fundamental ya que es un parámetro que afecta decisivamente en las mezclas abiertas. A continuación se explica como realizar el cálculo.

En una mezcla asfáltica formada por una serie de componentes ponderales, la masa total “M” vale:

$$M = m_1 + m_2 + m_3 + \dots$$

Siendo m_1 , m_2 , m_3 , etc., las masas individuales de cada componente (áridos gruesos, polvo mineral, ligante).

Como generalmente la composición de la mezcla se expresa por los porcentajes de cada componente respecto al total de la misma, se tiene también:

$$100 = T_1 + T_2 + T_3 + \dots$$

Siendo T_1 , T_2 , T_3 , etc., los tantos por ciento de cada componente respecto a la mezcla total, existiendo entre ambas expresiones las relaciones:

$$m_1 = \frac{M}{100} * T_1; \quad m_2 = \frac{M}{100} * T_2; \quad m_3 = \frac{M}{100} * T_3; \text{ etc.}$$

Con el objeto de facilitar los cálculos de huecos, se determina el valor de la densidad relativa de la mezcla de áridos, cuya expresión teórica es el cociente entre la suma de las masas de todos los componentes áridos de la mezcla, y la suma de las masas de volúmenes, respectivos, iguales de agua. Teniendo en cuenta las relaciones escritas anteriormente, se obtiene para esta densidad la expresión:

$$D_a = \frac{100}{\frac{T_1}{d_1} + \frac{T_2}{d_2} + \frac{T_3}{d_3} + \dots}$$

Siendo T1, T2 , T3 , etc., los tantos por ciento de cada árido sobre el total de áridos de la mezcla, y d1, d2 , d3, etc., las densidades relativas aparentes de estos mismos áridos.

Ahora se determina la densidad máxima teórica de las mezclas compactadas. Teóricamente esta densidad es la que se obtendría si al compactar una mezcla asfáltica se consiguiera una masa formada por áridos y ligante en la que no existieran huecos. Partiendo de una expresión teórica análoga a la de la densidad de la mezcla de áridos, pero incluyendo además las masas de ligante, se obtiene para esta densidad la siguiente expresión:

$$D_{\max} = \frac{100}{\frac{T_a}{D_a} + \frac{T_b}{d_b}}$$

Siendo T_a y T_b los porcentajes sobre mezcla total de los áridos y ligante, D_a y D_b sus respectivas densidades relativas.

La densidad relativa del ligante viene dada por el fabricante (ver ficha técnica del Olexobit MF) y vale $1,023 \text{ gr/cm}^3$.

Destacar que para obtener la densidad relativa de los áridos hay que seguir los pasos que se indican en la NLT-167 (Cálculo de densidad relativa de áridos en aceite de parafina). En el caso de este proyecto, no es necesario calcular la densidad relativa de cada árido por separado, puesto que por experiencia de la empresa, se sabe la densidad relativa que suman las tres fracciones de árido, esto es: la del 0/6 más la del 6/12 más la del filler de aportación, resultando un valor total de : $2,67 \text{ gr/cm}^3$.

Como ya se ha obtenido todos los parámetros necesarios para poder calcular el tanto por ciento de huecos en la mezcla, se determina cómo se hace. Los huecos de una mezcla compactada, representan la diferencia entre el volumen aparente de la mezcla y el volumen teórico ocupado por el betún y los áridos. Por consiguiente, el tanto por ciento de huecos en la mezcla, valdrá:

$$\%H = \left(1 - \frac{D_p}{D_{max}} \right) * 100$$

Siendo D_p la densidad relativa aparente de la mezcla compactada.

La normativa del PG-3 incluye una imposición para el porcentaje en huecos de las mezclas abiertas, que en concreto para una M10 y como se explicó en el capítulo 4, debe ser mayor o igual al 12% . Es importante tener en cuenta que antes de ensayar las probetas, éstas deben cumplir tanto valores de densidad (altura de las probetas) como de huecos que indique la norma. En caso contrario, se desechan las probetas.

5.2.3 Ensayo Cántabro

5.2.3.1 Objeto y campo de aplicación

El presente apartado se rige fundamentalmente por las normas NLT-352 (ensayo cántabro seco) y NLT-362 (ensayo cántabro húmedo). Estas normas describen el procedimiento a seguir para determinar la pérdida de cohesión que se produce por la acción del agua en mezclas bituminosas compactadas de granulometría abierta, de utilización en construcción de carreteras. Destacar que este procedimiento se aplica a MB de granulometría abierta fabricadas tanto en caliente como en frío, con ligantes modificados o sin modificar, cuyo tamaño máximo de árido sea inferior a 25mm .

El objetivo de este ensayo es comparar resultados entre series duplicadas de probetas, unas mantenidas en aire y otras sometidas a la acción del agua. Por ello se realizará series de seis probetas por cada tipo de filler (recordar que eran 4 tipos, haciendo un total de 24 probetas a ensayar). De cada serie de probetas, a tres se les realizará el ensayo en seco, y a las otras 3 el húmedo.

5.2.3.2 Aparatos y material necesarios

-**Tamices UNE** : 25mm, 12.5mm, 10mm, 5mm, 2.5mm, 630 μm , 320 μm y 80 μm .

-**Estufas**: que puedan alcanzar y mantener las temperaturas de 25°C, 45°C y 60°C, con precisión de $\pm 1^\circ\text{C}$.

-**Balanza**: hasta 2kg de carga con 0,1 gr de sensibilidad

-**Conjunto y maza de compactación**: referidos a la norma NLT-159 del ensayo Marshall, en cuanto a la fabricación de probetas.

- **Malla de plástico**: tipo mosquitera, para la sujeción de probetas.

- **Baño termostático**: de capacidad suficiente para alojar las probetas del ensayo y que pueda mantener la temperatura deseada constante dentro de $\pm 1^\circ\text{C}$.

- **Máquina de los Ángeles**: su empleo en este ensayo, viene determinado por la norma NLT-149. Más adelante se explicará su funcionamiento detalladamente.

- **Cámara termostática**: que asegure una temperatura constante durante el ensayo.

5.2.3.3 Procedimiento del ensayo Cántabro

1.- Las series de probetas fabricadas, se dividen aleatoriamente en dos grupos numéricamente iguales. En el caso de este estudio, seis probetas, se divide en dos grupos de tres.



Imagen 31. Seis probetas divididas en dos grupos de tres

2.- Se determina la masa de cada probeta, con aproximación de 0,1 gr y se anota ese valor como **P1**.

3.- Uno de los grupos de probetas, se deja reposar a temperatura ambiente (25°C aprox) durante al menos 24h.

4.- El otro grupo de probetas, se sumerge durante 24h en un baño de agua a 60°C , con un margen de $\pm 1^{\circ}\text{C}$ (en el caso de mezclas fabricadas en caliente).

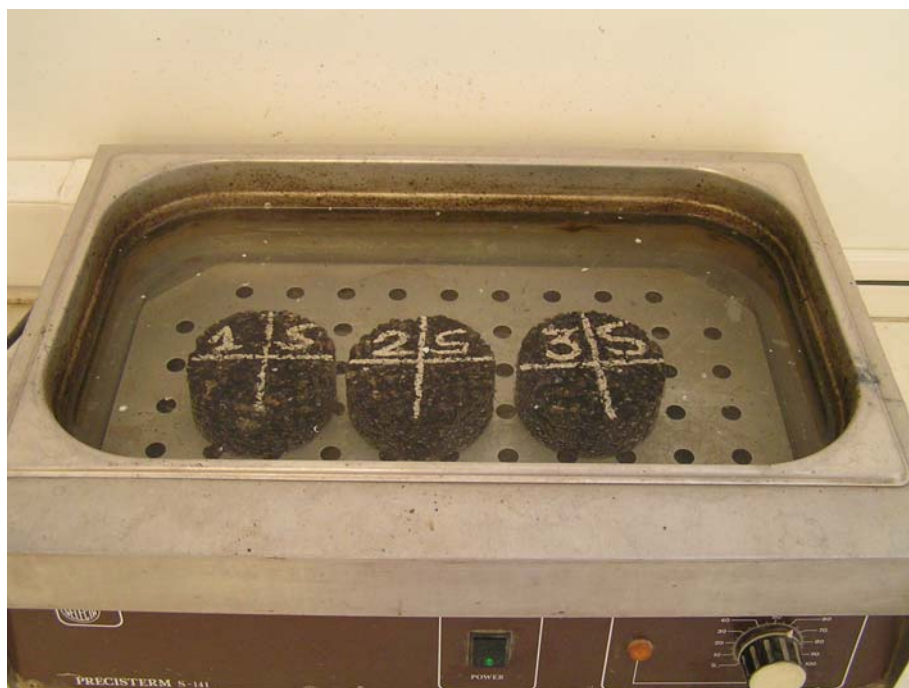


Imagen 32. Probetas en baño de agua a 60 °C

Seguidamente, se sacan las probetas del baño y se dejan reposar a temperatura ambiente otras 24h.

Pasado este tiempo, se determina la masa de cada probeta con aproximación de 0,1 gr y se anota como **Pc**.

* Nota: la diferencia entre Pc y P1, representa la masa de agua retenida por la probeta después del período de secado a temperatura ambiente. Esta diferencia (**Pc-P1**) se tiene en cuenta en el cálculo del resultado de pérdida de desgaste (%P), restándola de P2, que es el peso final de las probetas tras el ensayo.

5.- Después de las acciones y tiempos que se describen en los pasos 3 y 4, se procede a determinar la pérdida por desgaste por medio del ensayo cántabro, de acuerdo con la norma NLT-352, de cada una de las probetas de ambos grupos. Para ello se empleará la máquina de desgaste de Los Ángeles.



Imagen 33. Máquina de desgaste de Los Ángeles



Imagen 34. Probeta a ensayar dentro del tambor



Imagen 35. Tambor cerrado máquina de desgaste



Imagen 36. Máquina de desgaste con las puertas de seguridad cerradas

6.- El número de vueltas del tambor de la máquina de Los Ángeles es de 300 para mezclas en caliente (200 vueltas, para mezclas en frío).



Imagen 37. 300 vueltas en el display de la máquina

7.- Al final de someter a la probeta a ese número de vueltas dentro de la máquina de Los Ángeles, se saca la probeta ensayada y se determina nuevamente su masa con aproximación de 0,1 gr, y se anota este valor como **P2**.

8.- El ensayo se repite de igual manera, con cada una de las probetas de cada serie fabricadas.



***Imagen 38. Probetas antes (fila inferior) y después (fila superior) del ensayo
Cántabro***

5.2.3.4 Cálculos y resultados obtenidos

El título de este proyecto hace referencia a la "adhesividad árido-ligante" en MBC tras añadirles distintos tipos de filler. Esto es, se va a analizar ese factor como la fuerza o cohesión presente en la mezcla, tras practicarle el ensayo Cántabro (tanto seco como húmedo) a cada probeta. Por ello, se verá qué filler otorga mejores propiedades a cada mezcla, evaluando la pérdida por desgaste en cada una de las mismas. Esta pérdida por desgaste, expresada en tanto por ciento de la masa inicial, se calcula de la siguiente manera:

$$p \% = \frac{p_1 - p_2}{p_1} \times 100$$

Siendo:

P = valor de la pérdida por desgaste, en %

P1 = masa inicial de la probeta

P2 = masa final de la probeta

Con todo esto, se determina el valor medio de los porcentajes de las pérdidas de las probetas de cada grupo por separado, anotándose como "**Pa**" las probetas en seco, y "**Ps**" las probetas sumergidas en agua.

Así pues, el último paso es establecer una comparación entre ambos valores, resultando así lo que se denomina como " índice de aumento de pérdidas". Expresado como porcentaje, se calcula como: $(Ps / Pa) \times 100$

Este último parámetro, debe redondearse al 1% para expresarlo como resultado del ensayo.

5.3 Resultados obtenidos

El diseño de mezclas abiertas se basa fundamentalmente en dos criterios: resistencia a la disgregación y permeabilidad. Normalmente para mejorar la cohesión y evitar la disgregación de una mezcla se debe aumentar su contenido en áridos finos y ligante, pero por otra parte, si se desea aumentar la permeabilidad y porosidad, se tiene que incrementar el porcentaje de gruesos y reducir la fracción fina. Con el diseño de la mezcla drenante se busca solucionar esta problemática, logrando el máximo contenido de huecos sin que la resistencia a las cargas de tráfico sea mermada.

Los resultados obtenidos se van clasificar en cuatro apartados:

- 1.- Resultados en serie de probetas filler silicio.
- 2.- Resultados en serie de probetas filler calizo.
- 3.- Resultados en serie de probetas filler cemento.
- 4.- Resultados en serie de probetas filler incineración lodos depuradora.

Finalmente habrá un quinto apartado, en el que se incluyen las fotos de las 24 probetas ensayadas que componen el estudio del proyecto, separadas en grupos de 6 probetas (por cada tipo de filler a analizar).

5.3.1 Resultados en serie de probetas filler silicio.

Conocida la fórmula de trabajo, se fabrican seis probetas añadiendo filler de tipo silicio, cumpliendo en todo momento con la norma. Tras dividir las en dos grupos de tres (para cada tipo de ensayo cántabro), se analizará en todas ellas: densidad (gr/cm^3), huecos (%), y pérdida de desgaste (%). Obteniendo la siguiente tabla:

Probeta	Densidad	Huecos	Desgaste
seco 1	2.108	14.968	9.267
seco 2	2.083	15.958	8.725
seco 3	2.187	11.789	5.550
humedo 1	2.104	15.104	24.744
humedo 2	2.128	14.161	23.027
humedo 3	2.137	13.776	13.935

Tabla 24. Resultados filler silicio

Destacar que todas las probetas cumplen las dimensiones establecidas por la norma, así como la temperatura antes de la compactación. Esto se aprecia en un valor más o menos parecido de densidad entre las mismas.

También se puede ver que los valores de porcentaje de huecos y porcentaje de pérdida por desgaste cumplen con la norma según lo exigido en el PG-3 para una mezcla M10, según lo expuesto en la tabla 19 del capítulo 4.

A continuación se adjunta una serie de gráficas en las que se observa la evolución de estos parámetros en la serie de probetas.

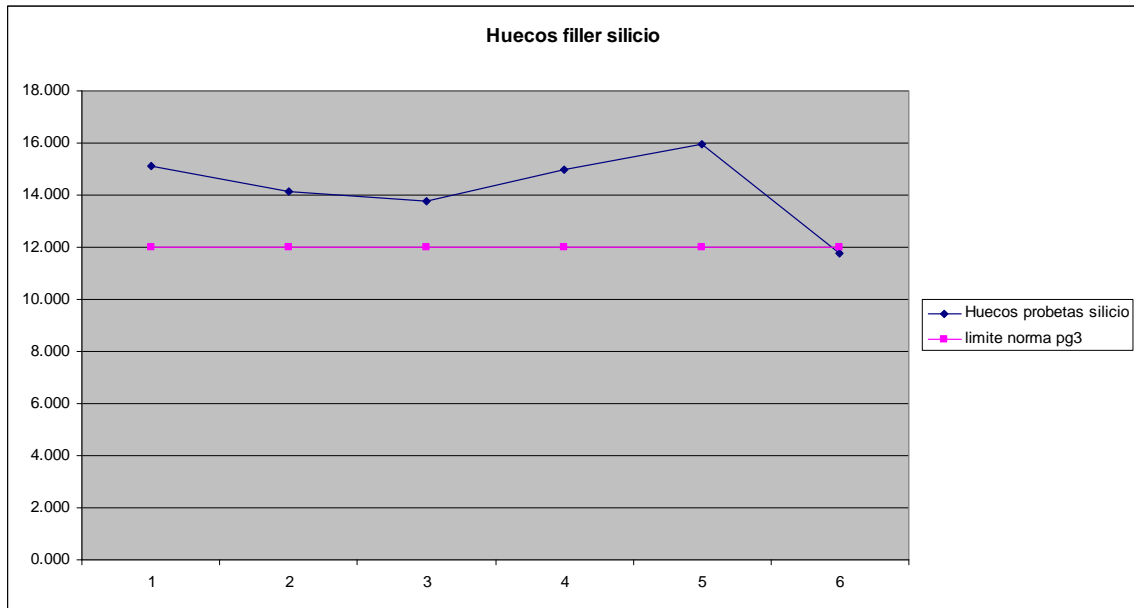


Imagen 39. Huecos en filler silicio

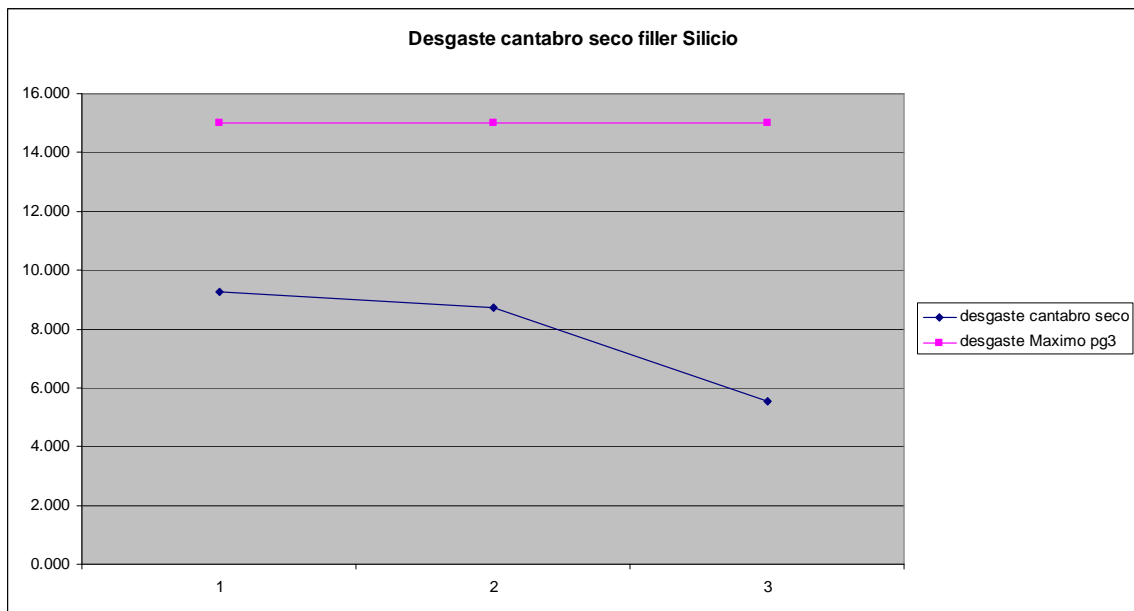


Imagen 40. Desgaste en seco filler silicio

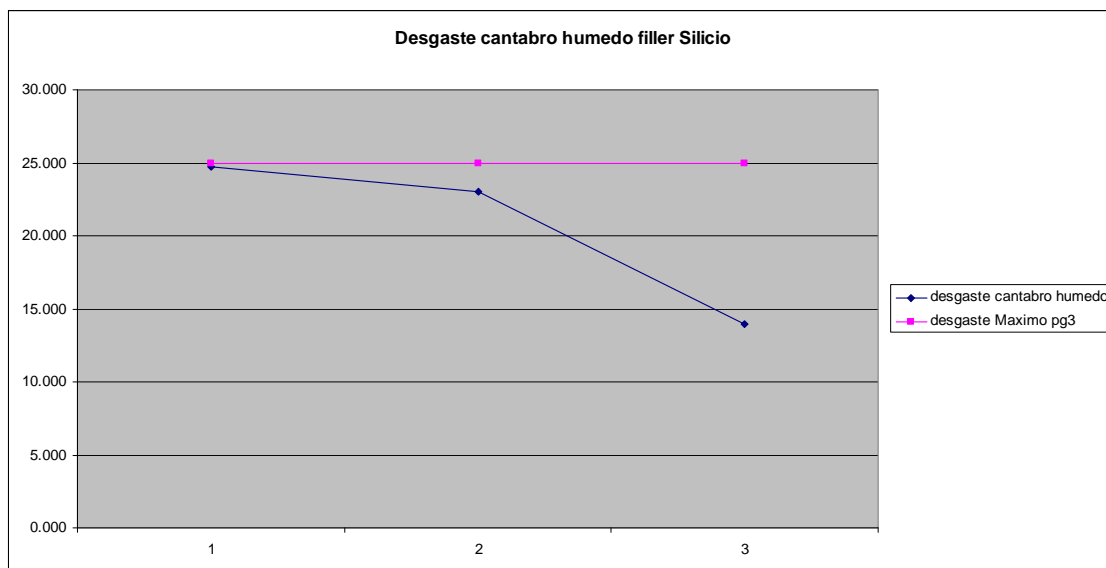


Imagen 41. Desgaste húmedo filler silicio

En las tres gráficas se analiza huecos y desgaste en las probetas de filler silicio. En color rosa aparece el valor que dicta la norma del PG-3, y en color azul los resultados obtenidos. En el caso de los huecos, se aprecia que todas las probetas superan el 12% ; el desgaste en seco es inferior al 15% y en el desgaste en húmedo, se aprecia también que es inferior al 25%. Por tanto se cumple con la norma en todo momento en esta primera serie de probetas. Se realizará una comparativa con las otras series de probetas, en el apartado 5.4.

5.3.2 Resultados en serie de probetas filler calizo.

Conocida la fórmula de trabajo, se fabrican seis probetas añadiendo filler de tipo calizo, cumpliendo en todo momento con la norma. Tras dividir las en dos grupos de tres (para cada tipo de ensayo cántabro), se analizará en todas ellas: densidad (gr/cm^3), huecos (%), y pérdida de desgaste (%). Obteniendo la siguiente tabla:

Probeta	Densidad	Huecos	Desgaste
seco 1	2.103	15.147	7.998
seco 2	2.119	14.532	8.184
seco 3	2.099	15.303	9.381
humedo 1	2.064	16.728	18.882
humedo 2	2.084	15.939	20.000
humedo 3	2.024	18.339	21.615

Tabla 25. Resultados filler calizo

Destacar que todas las probetas cumplen las dimensiones establecidas por la norma, así como la temperatura antes de la compactación. Esto se aprecia en un valor más o menos parecido de densidad entre las mismas.

También se aprecia que los valores de porcentaje de huecos y pérdida por desgaste, cumplen con la norma según lo exigido en el PG-3 para una mezcla M10.

A continuación se adjunta una serie de gráficas en las que se observa la evolución de estos parámetros en la serie de probetas.

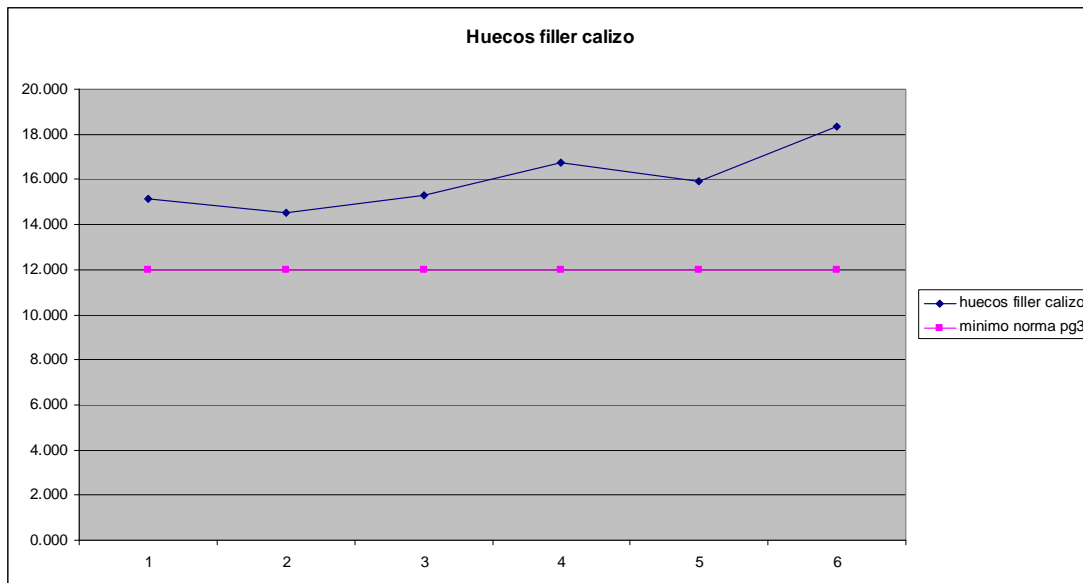


Imagen 42. Huecos filler calizo

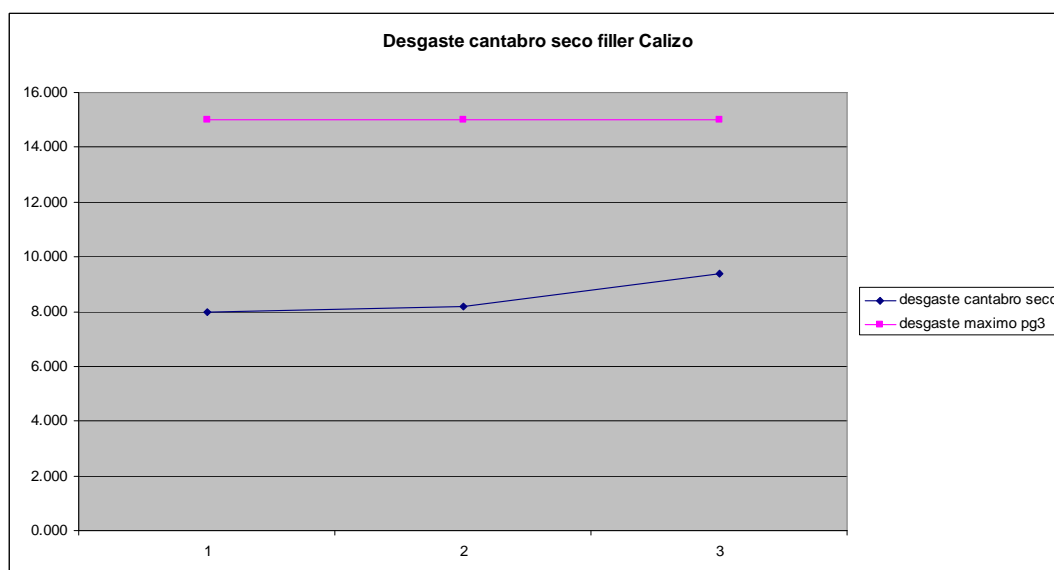


Imagen 43. Desgaste seco filler calizo

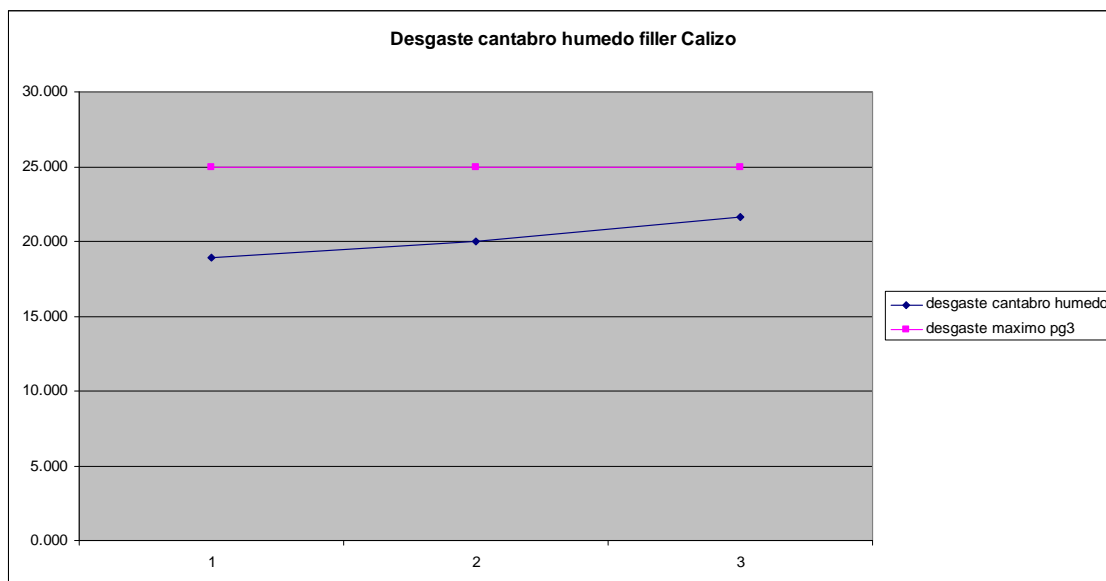


Imagen 44. Desgaste húmedo filler calizo

En las tres gráficas se analizan huecos y desgaste en las probetas de filler calizo. En color rosa aparece el valor que dicta la norma del PG-3, y en color azul los resultados obtenidos. En el caso de los huecos, se ve que todas las probetas superan el 12% ; en el desgaste en seco se puede apreciar que es inferior al 15% y en el desgaste en húmedo, se ve también que es inferior al 25%. Por tanto se cumple con la norma en todo momento en esta segunda serie de probetas. Se realizará una comparativa con las otras series de probetas, en el apartado 5.4.

5.3.3 Resultados en serie de probetas filler cemento.

Conocida la fórmula de trabajo, se fabrican seis probetas añadiendo filler de tipo cemento, cumpliendo en todo momento con la norma. Tras dividir las en dos grupos de tres (para cada tipo de ensayo cántabro), se analizará en todas ellas: densidad (gr/cm^3), huecos (%), y pérdida de desgaste (%). Obteniendo la siguiente tabla:

Probeta	Densidad	Huecos	Desgaste
seco 1	2.090	15.670	8.236
seco 2	2.055	17.088	9.118
seco 3	2.102	15.195	8.406
humedo 1	2.002	19.233	19.817
humedo 2	2.019	18.535	18.746
humedo 3	2.091	15.631	12.876

Tabla 26. Resultados filler cemento

Destacar que todas las probetas cumplen las dimensiones establecidas por la norma, así como la temperatura antes de la compactación. Esto se aprecia en un valor más o menos parecido de densidad entre las mismas.

También se puede ver que los valores de porcentaje de huecos en mezcla y pérdida por desgaste, cumplen con la norma según lo exigido en el PG-3 para una mezcla M10.

A continuación se adjunta una serie de gráficas en las que se observa la evolución de estos parámetros en la serie de probetas.

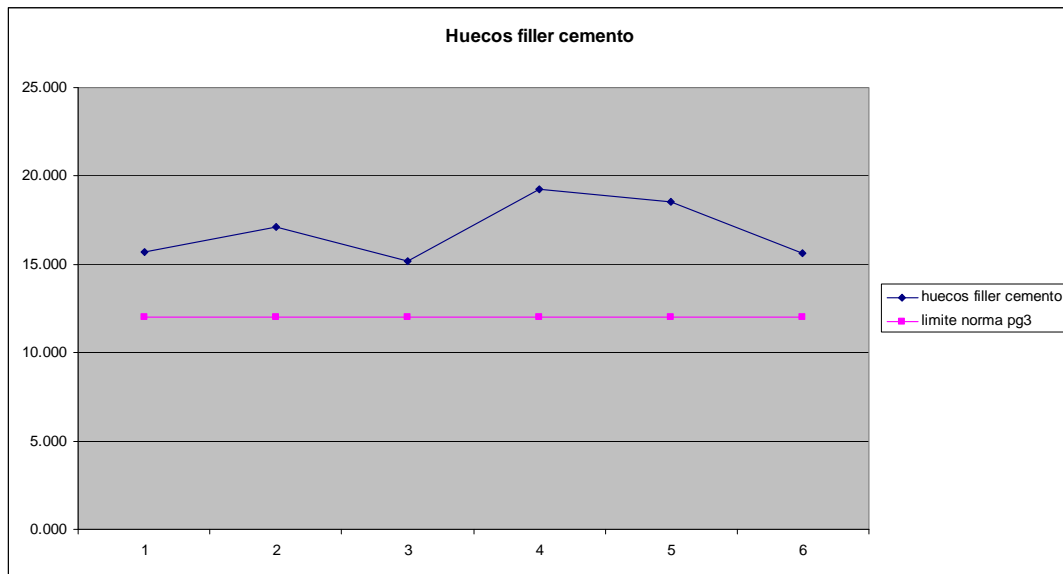


Imagen 45. Huecos filler cemento

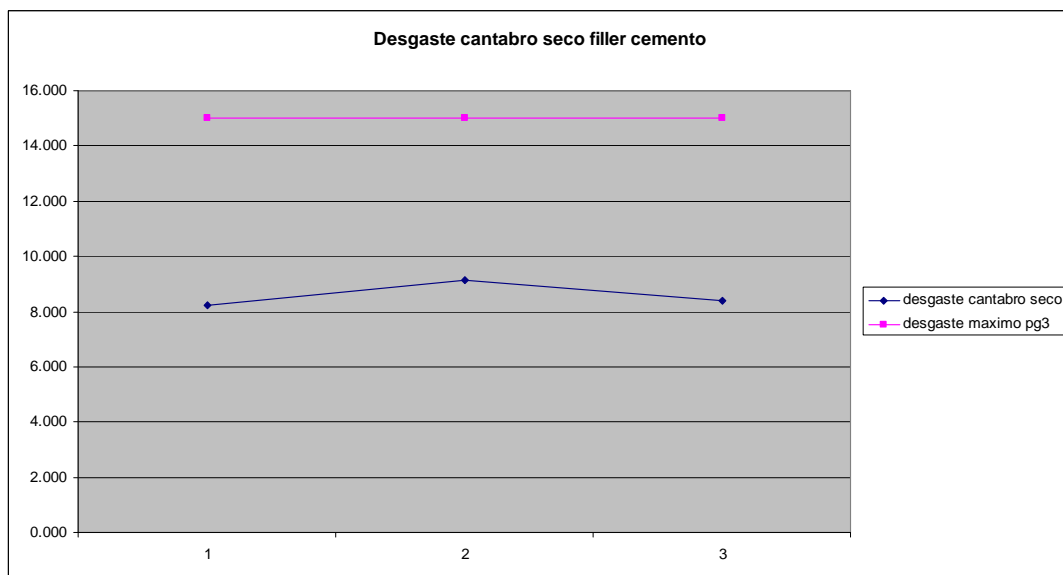


Imagen 46. Desgaste seco filler cemento

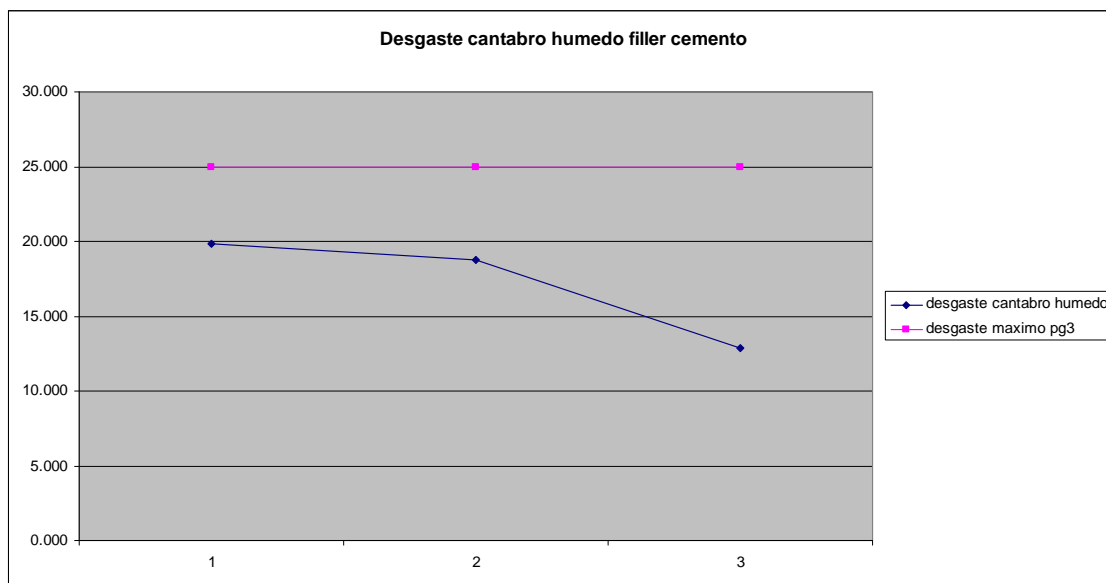


Imagen 47. Desgaste húmedo filler cemento

En las tres gráficas se analizan huecos y desgaste en las probetas de filler cemento. En color rosa aparece el valor que dicta la norma del PG-3, y en color azul los resultados obtenidos. Viendo estos valores, no solo se aprecia que se cumple la norma, si no que además es la serie de probetas que presenta mejor resistencia al desgaste. No obstante, se hará comparativa con todas las series de probetas en el apartado 5.4.

5.3.4 Resultados en serie de probetas filler incineración lodos depuradora.

Conocida la fórmula de trabajo, se fabrican seis probetas añadiendo filler de lodos depuradora, cumpliendo en todo momento con la norma. Tras dividir las en dos grupos de tres (para cada tipo de ensayo cántabro), se analizará en todas ellas: densidad (gr/cm^3), huecos (%), y pérdida de desgaste (%). Obteniendo la siguiente tabla:

Probeta	Densidad	Huecos	Desgaste
seco 1	2.034	17.944	29.662
seco 2	2.017	18.631	37.934
seco 3	2.019	18.564	41.320
humedo 1	2.080	16.098	51.585
humedo 2	2.033	17.999	55.340
humedo 3	2.002	19.239	64.796

Tabla 27. Resultados filler lodos depuradora

A pesar de que los valores de densidad salen parecidos debido al cumplimiento de la norma en cuanto a dimensiones de las probetas y temperatura antes de la compactación, los valores obtenidos en los ensayos son pésimos. Tan sólo se cumple con el valor de porcentaje de huecos que indica la norma (superior al 12%). En cuanto al valor de desgaste tanto en seco como en húmedo, se aprecia valores muy por encima de los que indica el PG-3. Por ello se deduce de estos ensayos que este filler no es apto como aportación en las M10, según los parámetros de la fórmula de trabajo. Podría ser utilizado, si se cambiase la dosificación en las probetas para este tipo de filler.

A continuación se adjunta una serie de gráficas en las que se observa la evolución de estos parámetros en la serie de probetas.

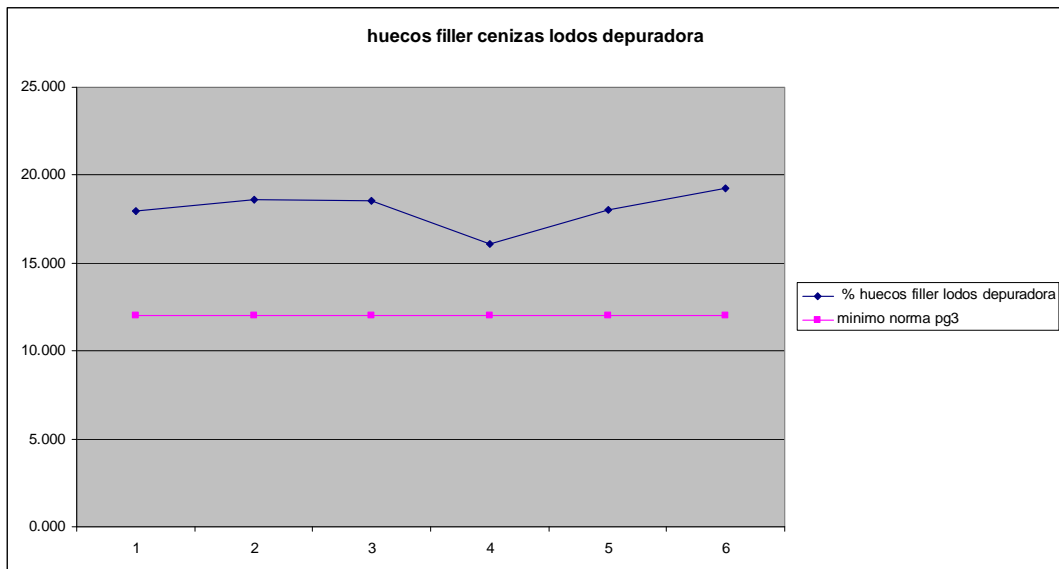


Imagen 48. Huecos filler lodos depuradora

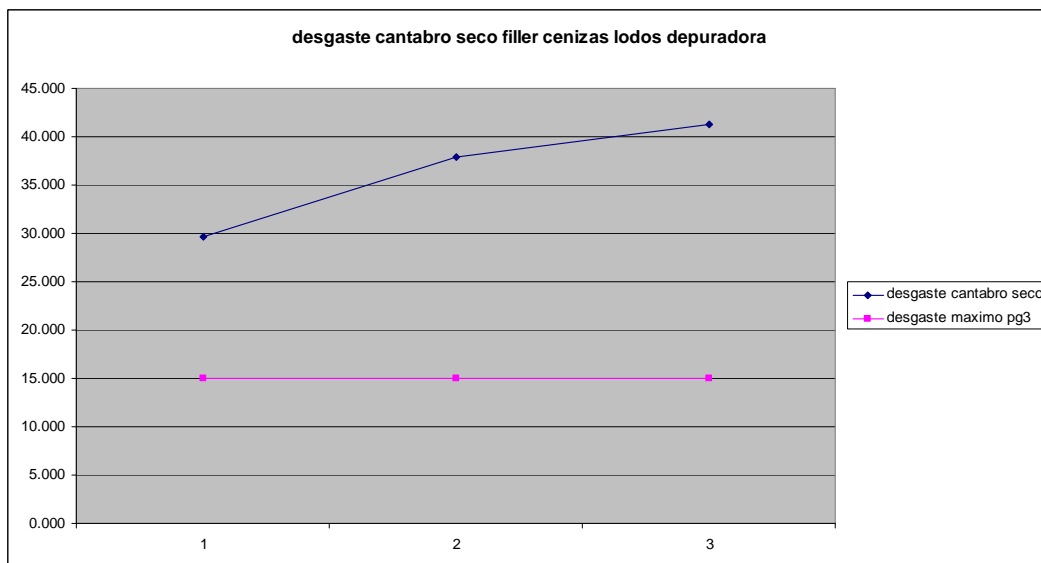


Imagen 49. Desgaste seco filler lodos depuradora

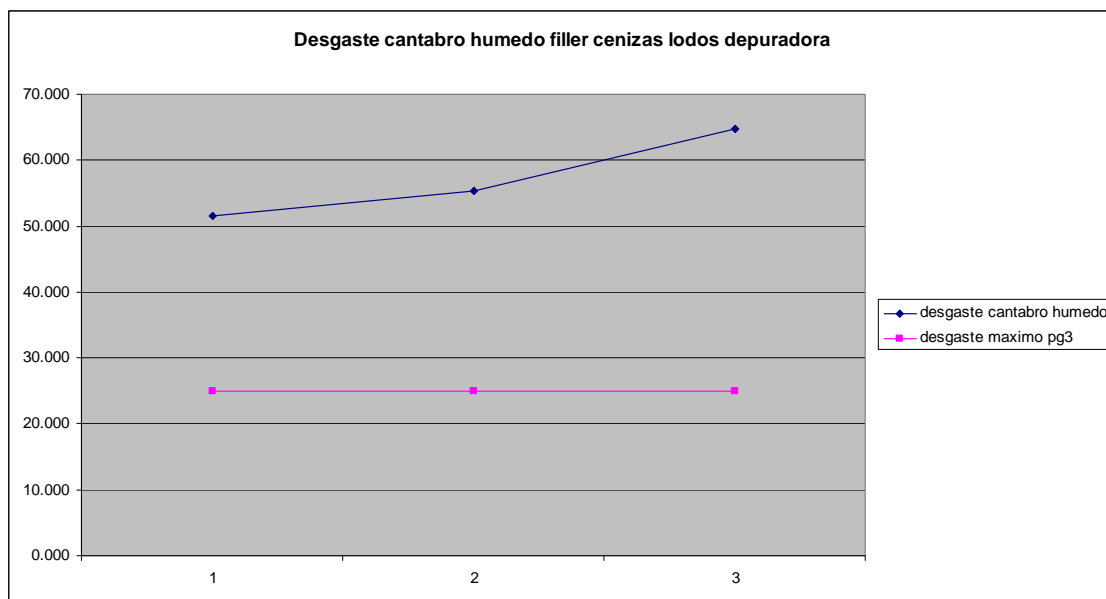


Imagen 50. Desgaste húmedo filler lodos depuradora

Se aprecia en estas gráficas que se supera el valor de desgaste permitido por la norma del PG-3. Por ello esta serie de probetas sirve para darse cuenta que este tipo de filler, cuyo fin era valorizar un residuo, no es apto, puesto que presenta un valor de resistencia a la disgregación en los componentes de la mezcla muy bajo.

5.3.5 Fotografías de las probetas tras su estudio

1.- Primera serie de probetas (filler silicio):



Imagen 51. Fila superior, tras ensayo cántabro seco.

Fila inferior, tras ensayo cántabro húmedo.

2.- Segunda serie de probetas (filler calizo):



Imagen 52. Fila superior, tras ensayo cántabro seco.

Fila inferior, tras ensayo cántabro húmedo.

3.- Tercera serie de probetas (filler cemento): se puede apreciar el buen comportamiento frente a desgaste tanto en seco como en húmedo.



Imagen 53. Fila superior, tras ensayo cántabro seco.

Fila inferior, tras ensayo cántabro húmedo.

4.- Cuarta serie de probetas (filler lodos depuradora): probetas prácticamente destrozadas tras su ensayo.



Imagen 54. Fila superior, tras ensayo cántabro seco.

Fila inferior, tras ensayo cántabro húmedo.

5.4 Conclusiones

A simple vista se puede apreciar tras las gráficas, tablas y fotografías del apartado anterior, que variando únicamente el tipo de filler, bajo unas mismas condiciones de fabricación, compactación y ensayo de probetas, así como de dosificación, se obtienen resultados diferentes. Esto da una idea, efectivamente, de que la naturaleza del tipo de filler de aportación influye muy notablemente en este tipo de mezclas. Esto es debido a la acción de su gran superficie específica que presenta, dentro de la mezcla bituminosa.

El objetivo del proyecto es estudiar qué filler confiere mejores propiedades de resistencia a las mezclas, analizando este aspecto bajo el ensayo cántabro de pérdida de desgaste, relacionado a su vez con la adhesividad árido-ligante (cohesión en la mezcla). Como objetivo secundario, se puede analizar cómo influye también la naturaleza del filler en la porosidad de las mezclas, esto es, el porcentaje de huecos.

Por ello, y a modo de resumen del presente proyecto, se presenta la siguiente tabla donde se recogen los **valores medios** de cada parámetro a analizar, según el filler de aportación:

Naturaleza filler	Densidad	Huecos mezcla	Desgaste (seco)	Desgaste (humedo)
Silicio	2.1245	14.2928	7.8473	20.5687
Calizo	2.0822	15.9980	8.5207	20.1655
Cemento	2.0601	16.8920	8.5866	17.1467
Lodos depuradora	2.0307	18.0793	36.3052	57.2402

Tabla 28. Resumen de los valores medios obtenidos en el proyecto, según la aportación de distinto filler

Se explicará los resultados de esta tabla, a modo de comparación entre las distintas series de probetas, haciendo uso de las siguientes gráficas:

1.- Comparativa del porcentaje de huecos en mezcla:

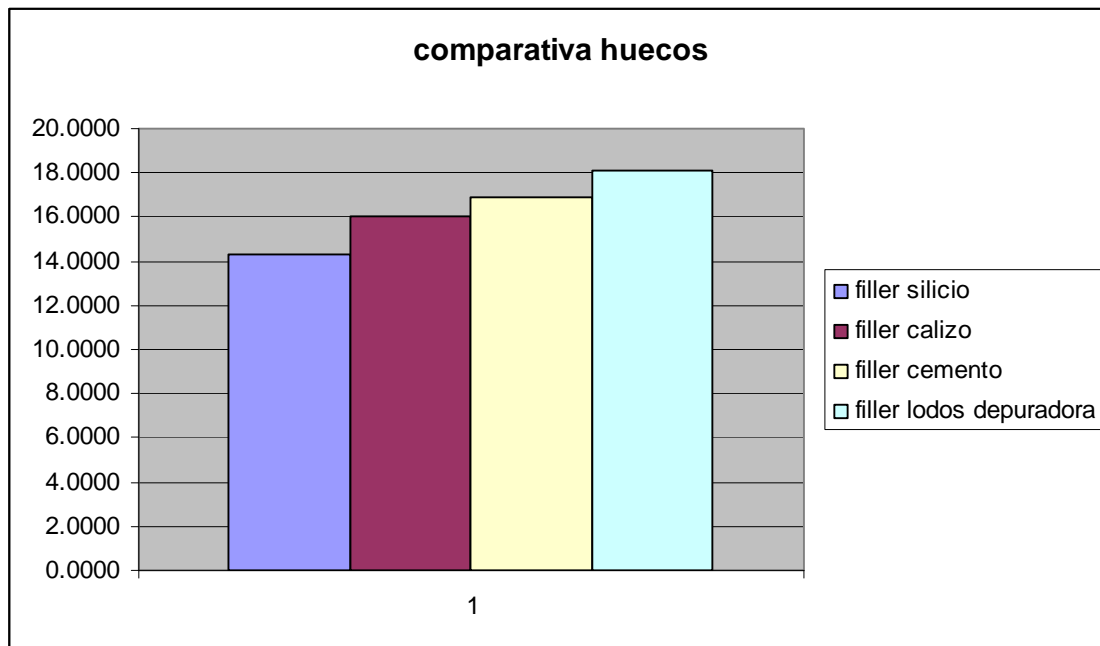


Imagen 55. Comparativa de huecos según el filler de aportación

Se puede apreciar que todos los valores superan el 12% exigido por el PG-3. Pero aunque se cumpla con la norma, el objetivo está en buscar el equilibrio entre porosidad y desgaste. Por ello se puede ver que la serie de probetas de filler de lodos de depuradora, es la que presenta mayor porcentaje de huecos, pero eso influye también en una peor resistencia al desgaste, por tanto en esta serie de probetas ese equilibrio porosidad-desgaste no es el adecuado. En el resto de series de probetas con otros filleres de aportación, se verá a continuación que sí existe ese equilibrio, entonces el debate estará en decidir cuál es el mejor. Para ello se tendrá en cuenta, además de estas gráficas, el factor económico.

2.- Comparativa del desgaste de las probetas:

Aquí se presentan dos grandes grupos: las probetas que se han ensayado en seco, y las que se han ensayado bajo el efecto del agua. Como el valor más restrictivo es el de la pérdida por desgaste en húmedo, se analizará este valor en primer lugar a la hora de establecer qué filler es mejor, comentando en segundo plano el desgaste en seco.

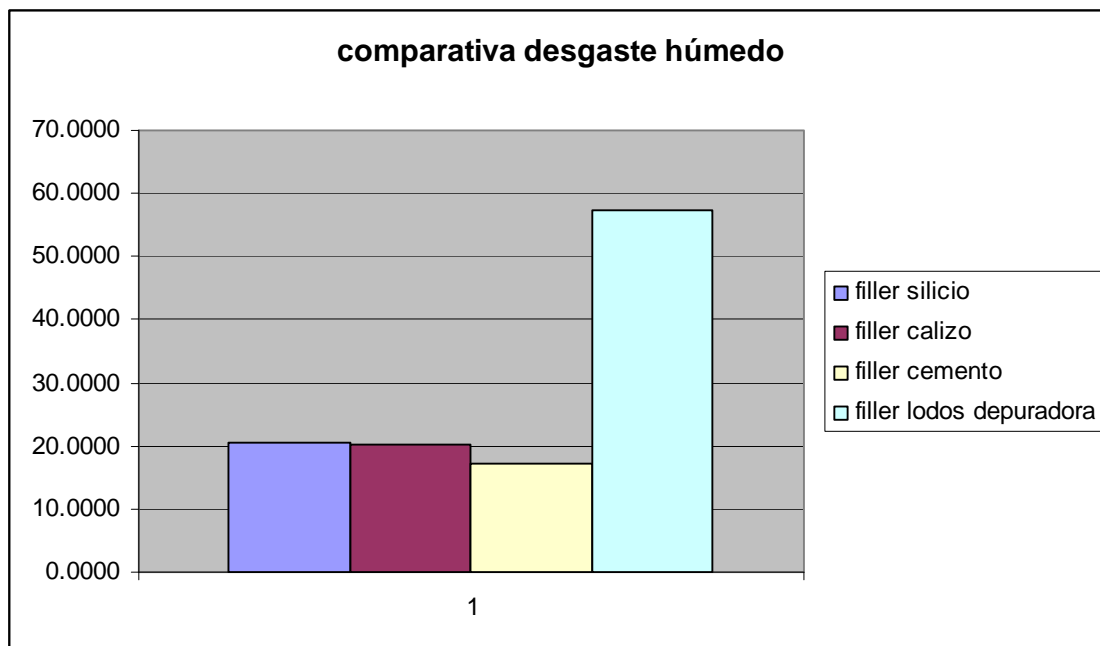


Imagen 56. Comparativa del desgaste por el ensayo Cántabro húmedo, según el filler de aportación

A simple vista se puede apreciar que el mejor es el filler cemento, pues presenta un valor medio de pérdida de desgaste más pequeño que el resto, y que el peor, como se comentó con anterioridad, es el del filler proveniente de la incineración de lodos de depuradora, pues presenta un valor de pérdida por desgaste desorbitado.

No obstante, la conclusión del proyecto no acaba aquí, pues también se obtienen unos valores muy próximos entre sí, a la par que muy buenos en cuanto a desgaste, provenientes de los datos de las series de probetas del filler silicio y calizo. Aquí es donde interviene el factor económico a la hora de tomar una decisión.

Antes de comentar dicho factor económico, se cita brevemente los valores de desgaste en seco:

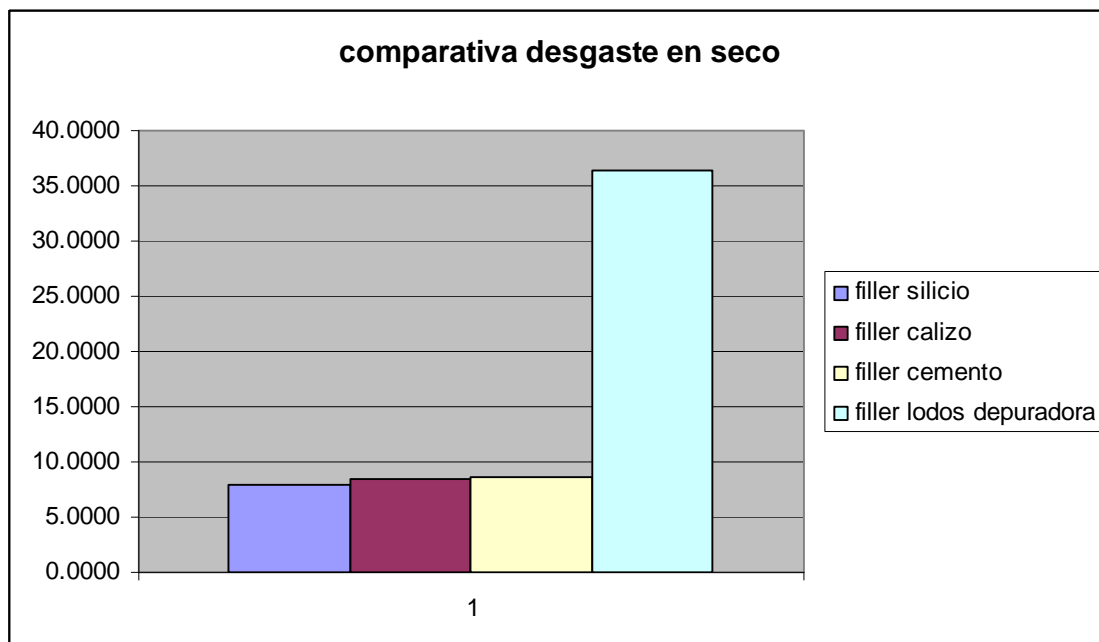


Imagen 57. Comparativa del desgaste por el ensayo Cántabro seco, según el filler de aportación

En dicha gráfica una vez más se desecha el filler de lodos de depuradora, y se aprecia que también compiten en cuanto a resultados buenos de desgaste, los tres filleres restantes, siendo ligeramente mejor (en seco) el comportamiento de las probetas de filler silicio.

Para poder tener en cuenta el último factor de decisión, es necesario recurrir a la siguiente tabla, donde se muestra el precio de mercado de cada tipo de filler:

Tipo filler aportación	Precio (€ / Tn)
Silicio	9-11
Calizo	30
Cemento	100
Cenizas lodos depuradora	(valorizar residuos)

Tabla 29. Precio (€/ Tn) de cada filler

En dicha tabla desaparece por completo ese aspecto competitivo entre los tres filleres que la encabezan, pues el precio es muy distinto.

Se puede apreciar como el cemento es el más caro de todos: resultado lógico del proyecto, pues es el que efectivamente presenta las mejores propiedades en las mezclas bituminosas (tanto en seco, como en húmedo; así como el equilibrio óptimo entre porosidad y resistencia) .

A continuación se encuentran los otros dos filleres restantes (silicio y calizo), los cuales presentan propiedades muy similares con un precio más razonable, siendo más barato el silicio.

Y en último lugar está el filler de lodos de depuradora. Destacar que no se incluye precio, pues proviene de la incineración de los lodos (residuos) de las depuradoras. El objetivo del proyecto era ver cómo se podía valorizar este residuo en este tipo de mezclas, pero se ha visto que los resultados no son buenos.

Por último falta por contestar la pregunta que resume la idea principal de este proyecto. Esto es, ver qué filler es el mejor, tras el análisis de las distintas series de probetas. Atendiendo a factores económicos, el silicio o el calizo serían la mejor opción a la hora de reducir costes en obra, pues ofrecen resultados muy buenos y parecidos entre sí, a un precio razonable. Si por el contrario se busca obtener las mejores prestaciones dejando en segundo plano el factor económico, sin duda la respuesta es el filler cemento.

5.5 Perspectivas futuras

Las novedades que pueden esperarse para los próximos años se basan en lo que está empezando a desarrollarse desde hace poco en España, en cuanto a materia de infraestructuras e investigación en carreteras.

En lo relativo a mezclas drenantes, la investigación en España no ha avanzado mucho, aunque el principal campo de desarrollo es el de conseguir una mayor resistencia a la disgregación, mediante el uso de mayores películas de ligante, adición de fibras o de filleres especiales, así como el uso de ligantes modificados.

Otro campo de trabajo es el de alargar la durabilidad de las propiedades drenantes, para lo que deberían experimentarse las técnicas de doble capa. En éstas, la capa superior se encarga de filtrar las impurezas y es fácil de limpiar. Mientras que la inferior es difícil de colmatar por el gran tamaño de huecos. Este tipo de mezclas se emplea en otros países como Dinamarca e Italia, en los cuales se ha demostrado con su uso una notable reducción del ruido.

Dentro de esta línea de mezclas para reducir el ruido, están las mezclas poroelásticas, desarrolladas en Suecia, en las que se incorpora caucho de neumático como parte o único constituyente del árido, y con resinas de poliuretano como ligante, llegando a alcanzar un 30% de huecos y presentando muy buena reducción del ruido. Falta por mejorar el factor de resistencia al deslizamiento.

En lo relativo a mezclas tipo F y M en España, hay mejoras desarrolladas en otros países que acabarán introduciéndose en nuestro país, como la disminución de espesores mediante el empleo de maquinaria especial, que permite que el campo de aplicación se solape con los tratamientos superficiales. En esta línea de investigación surgen las mezclas bituminosas de alto módulo.

Bibliografía

- "Panorámica española de las mezclas bituminosas. Desarrollos recientes" (artículo de Diciembre 2006).
- Manual de carreteras, volumen II .
- Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes (PG-3).
- "Ensayos de mezclas bituminosas. Criterios de diseños y dosificación". UPC.
- <http://www.bp.com>
- www.carreteros.org (consultar normas NLT)
- VI Congreso nacional de firmes.
- Conferencia Miró “ Nuevas mezclas para capas de rodadura y su influencia en el confort”.
- " Materiales básicos para mezclas bituminosas". UPC (capítulo 2).
- "Mezclas asfálticas ".UPC (capítulo 3) .
- Pavimentos baja sonoridad UPC (profesor Rodrigo Miró Recasens).
- "Introducción a la tecnología de los microaglomerados asfálticos en frío y discontinuos en caliente". Universidad de Chile.