

PANORÁMICA DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS EN CARRETERAS

Breve evolución histórica

EDITA:

Asociación Técnica de Carreteras
C/ Monte Esquinza, 24
28010 Madrid

IMPRESIÓN:

Huna Soluciones Gráficas S.L.
Avenida Montes de Oca, 7 Portal 6
28703 S.S. de los Reyes (Madrid)

ISBN:

978-84-95641-55-7

DEPÓSITO LEGAL:

M-

Impreso en España - Printed in Spain

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	5
1. ANTECEDENTES DE LOS FIRMES.	7
1.1 Antecedentes en España de las actuales mezclas asfálticas	8
1.2 Las que se quedaron por el camino	12
2. MATERIALES CONSTITUYENTES DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS	13
2.1 Áridos.	13
2.2 Betún	19
2.3 Aditivos en mezclas bituminosas	23
3 FABRICACIÓN DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE	27
3.1 Primeras plantas y su evolución.	27
3.2 Primeras plantas en España	29
3.3 Normativa asociada a las plantas	33
4. GENERALIDADES DE LA PUESTA EN OBRA DE MEZCLAS BITUMINOSAS	34
4.1 La puesta en obra desde mediados del siglo XX	34
4.2 La puesta en obra EN LA actualidad	38
5. EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL DISEÑO DE MEZCLAS BITUMINOSAS EN ESPAÑA	41
6. CONTROL DE CALIDAD	44
6.1 EVOLUCIÓN DEL CONTROL DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE	45
6.2 EVOLUCIÓN DEL CONTROL DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS EN FRIO	47
6.3 NORMAS DE ENSAYO	48
7 BIBLIOGRAFIA	49
ANEXO 1	
EVOLUCIÓN DISEÑO DE MEZCLAS. CUADROS RESUMEN POR TIPO DE MEZCLA	51
ANEXO 2	
EVOLUCIÓN DISEÑO DE MEZCLAS. MODIFICACIONES NORMATIVAS	61

Este documento ha sido redactado por el Grupo de Trabajo “Mezclas Bituminosas” del Comité de Firms de la Asociación Técnica de Carreteras. Las personas que componen el Grupo de Trabajo son:

- **Jesús Felipo Sanjuán (coordinador)**
- Marisol Barral Vázquez
- Jacinto Luis García Santiago
- Francisco Guisado Mateo
- María Elena Hidalgo Pérez Eiffage Infraestructuras
- Valverde Jiménez Ajo MITMA
- Juan Carlos Jiménez Lucas Diputación de Valencia
- Javier Loma Lozano Padecasa
- Miguel Moreno Encinas Elsan
- Fernando Moreno Navarro Universidad de Granada
- Jorge Ortiz Ripoll Arnó
- Javier Payan de Tejada González MITMA
- José Luis Peña Ruiz Asefma
- Vicente Pérez Mena Cepsa
- Mari Carmen Rubio Gámez Universidad de Granada
- María Nieves Sánchez Pallarés CEDEX
- Nuria Uguet Canal Eurovía

INTRODUCCIÓN

La evolución histórica de las mezclas bituminosas va indisolublemente unida al desarrollo de la movilidad por carretera.

En aproximadamente 100 años las mezclas bituminosas se han convertido en el material de referencia del sector de la pavimentación, estando su uso ligado a la aparición y desarrollo de los vehículos a motor. Así, en las primeras etapas, eliminar el polvo generado por el tránsito fue la principal prioridad. Poco a poco se incorporaron necesidades adicionales como: tener carreteras con capacidad suficiente, el creciente tráfico de vehículos pesados, proporcionar el necesario confort en la rodadura o garantizar la seguridad vial.

En las últimas décadas se han incorporado a la lista de necesidades las cuestiones ambientales, como son el impacto medioambiental de su construcción, mantenimiento y al final de su vida útil, la reducción de las emisiones totales de efecto invernadero debidas tanto a la carretera como al transporte, así como la mejora de su resiliencia frente al cambio climático. Por otra parte, también se está estudiando incorporar nuevas funcionalidades, no habituales en pavimentación, como puede ser la capacidad descontaminante, el control del agua de escorrentía, o la captación de energía, entre otros.

Una de las principales características físicas de las mezclas bituminosas es su flexibilidad, pero dicho concepto puede ser extrapolado al propio diseño de los firmes, que necesita adaptarse a las necesidades de los usuarios.

De la larga lista de funcionalidades que poseen los pavimentos asfálticos, la flexibilidad es la característica que está permitiendo a las mezclas bituminosas ser la materia prima fundamental de los pavimentos del futuro.

Esta flexibilidad es la que ha permitido que se produjera su adaptación en aspectos tan relevantes como los siguientes:

- En carreteras de alto tráfico, proporcionando funcionalidades específicas para cada capa del firme. Desde la capacidad estructural de las capas de base e intermedias hasta las propiedades específicas de las capas de rodadura.
- En las carreteras locales, permitiendo que con costes muy moderados se puedan mantener firmes en buen estado durante muchos años. Recordemos, ahora que está en todos los medios de comunicación el paulatino vaciamiento de las zonas rurales, que estas carreteras son el cordón umbilical que les permite acceder a bienes y servicios esenciales como son la educación o la sanidad.

Un detalle destacable es la convergencia que a nivel de tecnologías de materiales existe a nivel mundial. La falta de protección de derechos de propiedad industrial hace que las diversas tecnologías se trasladen de un lugar a otro sin barreras y podamos ver de forma casi simultánea en cualquier lugar del mundo, experiencias de mezclas fabricadas a baja temperatura, tecnologías para el aprovechamiento del fresado o el uso de subproductos de otras industrias. La creciente facilidad de comunicación a través de Internet ayuda a esta capacidad de diseminación tecnológica de la que los grandes beneficiados son los ciudadanos, al poder disponer de las más novedosas tecnologías a su servicio.

De cara al futuro, la incertidumbre que generará la revolución que está en marcha en el mundo de la automoción debido a la irrupción de la electrificación y de la conducción autónoma, puede verse como una amenaza o como una oportunidad: la flexibilidad de las mezclas bituminosas ¿no es una buena herramienta para abordar las nuevas necesidades de la movilidad por carretera?

1. ANTECEDENTES DE LOS FIRMES

Los avances en los firmes viarios en el siglo XIX llevaron a la creación de dos tipos básicos de firmes basados en piedra partida, los de Telford y los de McAdam; soluciones que dominaron el panorama de los firmes, en especial en las carreteras interurbanas, hasta que la aparición del automóvil y la generación de polvo por sus mayores velocidades y succión de sus neumáticos creó la necesidad de nuevas propuestas.

A mediados del siglo XIX, se habían empezado a aplicar en calles urbanas, en aceras y calzadas, capas de revestimiento asfáltico obtenidas con másticos derivados de rocas asfálticas naturales. Estas se procesaban por trituración y “cocido” en origen y se comercializaban en bloques, denominándose asfaltos naturales y alcanzando gran difusión y prestigio los procedentes de los yacimientos suizos de Val-de-Travers o los franceses de Seyssel. Los trabajos e investigaciones de M.de Coullaine¹ y Léon Malo² contribuyeron al asentamiento de estas soluciones, fundamentalmente másticos en caliente con una composición típica formada por un 60% de arena y un 40% de un ligante obtenido con la mezcla de 90% de asfalto natural con un 2,5% de aceite de resina y 7,5% de betún, el cual se extendía manualmente y compactaba con cilindros, denominándose asfalto comprimido.

Más tarde, en 1870, se debe al químico belga De Smedt la “invención” de las mezclas asfálticas en caliente tal como las conocemos hoy día. De Smedt, que había tenido alguna experiencia previa en Francia con material derivado de la trituración de roca asfáltica natural, se traslada a Estados Unidos en 1861, donde empieza con sus pruebas en 1869 y concibe en 1870, en la Universidad de Columbia, un procedimiento diseñando una granulometría para minimizar huecos, mezclando arena, piedra de machaqueo y betún, todos ellos en caliente, empleando betún mejorado con adiciones como albertita. Utilizaba betún natural de yacimientos como el del Lago Trinidad. Ese mismo año, obtiene la patente 101.594 “*Improvement in composition roofing, paving, &c*”, complementada con otras como la 103.581 de 31 de mayo de 1870 “*Laying Asphalt or Concrete Pavements or Roads*”. En 1870 llevó a cabo con éxito su aplicación en la William Street en Newark (New Jersey) y más tarde (1872-1873) en Nueva York en Battery Park y en la 5ª Avenida. Estas mezclas tenían alrededor de un 10% de ligante.

¹ De Coullaine, M. - Sur l'emploi des substances bitumineuses dans la construction des chaussées, sur la nature, la composition, les propriétés de ces substances et leurs diverses applications- Annales de Ponts et Chaussées (1850)

² Malo, L. - Note sur l'asphalte, son origine, sa préparation, ses applications (Annales des Ponts et Chaussées -1861 T1)

Su éxito contribuyó a la progresiva generalización de este tipo de mezclas, ayudada por la aparición de ensayos como el de la determinación de la idoneidad del ligante, que fueron evolucionando hasta desembocar en 1888 en un primer ensayo de penetración, atribuido a H.C.Bowen, de Barber Asphalt y sus sucesivas normalizaciones. Otro factor importante fue la cada vez mayor disponibilidad de betún de petróleo.

El problema del polvo había dado lugar a la creación, incluso, de una Liga contra el Polvo y como consecuencia a una amplia difusión a partir de 1902 de tratamientos con alquitrán, bien en forma de riegos superficiales o de penetración, bien en mezclas como el tarmacadam inventadas en 1901 por Edgar Purnell Hooley³. A partir del primer tercio del siglo XX se fueron imponiendo las soluciones basadas en betún de petróleo, sobre todo a partir de la aparición de las emulsiones de betún en la década de los 40s.

1.1. ANTECEDENTES EN ESPAÑA DE LAS ACTUALES MEZCLAS ASFÁLTICAS

Los asfaltos naturales comprimidos en el viario urbano también llegaron pronto a España, primero aplicando asfaltos naturales importados, como lo hecho en Madrid en el patio del Edificio de la Bolsa en la calle de La Leña (antigua Escuela de Caminos) en 1847 o en la Puerta del Sol y Ministerio de La Guerra en 1848, pero su alto coste hizo que se volviese la mirada a yacimientos nacionales como los de Soria y Álava. Así, la empresa Asfaltos del Volcán, que había montado una factoría para obtención de ligante en la aldea soriana de Fuentetoba y obtenido un Privilegio (534 en 1851) para proteger su procedimiento de fabricación, resulta adjudicataria de la exclusiva del asfaltado en algunas calles madrileñas, y en 1851 asfalta en Madrid el Paseo del Prado y la subida de coches al Retiro y varias calles como Cañizares, Juan de Herrera y Calderón de la Barca.

El Manual de Caminos que comprende trazado, construcción y conservación del Ingeniero de Caminos Espinosa, publicado en 1855, ya incluía las técnicas francesas de asfaltado.

En el País Vasco también se explotaron otros yacimientos similares como los de Maeztu en Álava, a partir de 1856, en el que la concentración de asfalto en unas calcarenitas del Campaense estaba entre el 9 y el 20%. Las minas de Maeztu, por su proximidad al ferrocarril disponían de un apartadero, lo que la hacía competitiva en lugares fuera de su entorno. Una empresa con actividad significativa hoy día en la pavimentación asfáltica, *Asfaltos Naturales de Campezo*, tuvo su origen, como refleja su nombre, en la explotación de un yacimiento en la misma comarca.

³ García Santiago, J.L. - ¿Cómo hemos llegado a los actuales firmes asfálticos? Unos pequeños apuntes históricos – Parte2. Los firmes se tiñen de oscuro hullero. (Blog Motores y Carreteras <https://jluisgsa.blogspot.com>) (2018)

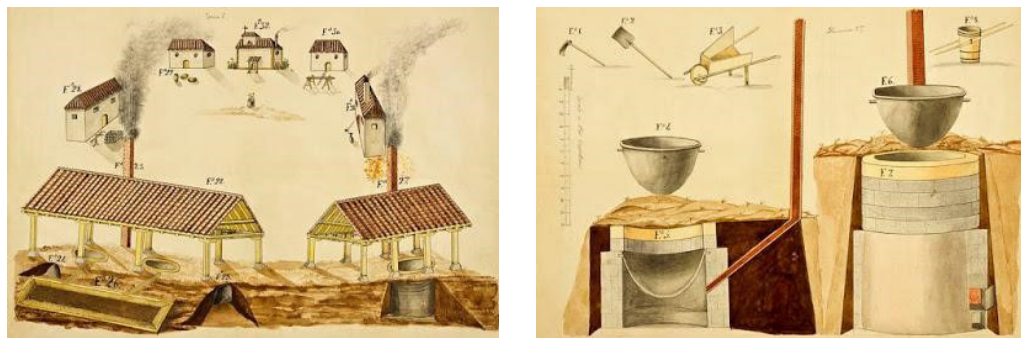


Figura 1. Asfaltos del Volcán- Factoría soriana (OEPM-1851 Privilegio 534)

La aplicación de los morteros de asfalto natural continuó en la primera mitad del siglo XX, en especial en zonas donde su proximidad a yacimientos lo hacía competitivo frente a tratamientos con alquitrán de hulla o los incipientes hormigones bituminosos con betún de petróleo importado en barriles. En 1928, Del Río reivindicaba y daba indicaciones del modo de aplicarlo y de un ensayo exitoso en la carretera de Madrid a Francia por Irún, a la salida de Miranda de Ebro .

Con ocasión de los ensayos del Circuito Nacional de Firmes Especiales de 1926 también se emplean mezclas con calizas bituminosas, como las de Maeztu , en tramos de ensayo con una base de tarmacadam con piedra ofítica y una capa superior de hormigón asfáltico con asfalto natural de Maeztu.

La progresiva expansión de los tratamientos y mezclas hechas con alquitrán de hulla o con los betunes derivados del petróleo fue haciendo perder competitividad a los asfaltos naturales, definitivamente arrinconados hacia el campo de los morteros y asfaltos fundidos (actuales másticos bituminosos de la EN 13108-6) en la zona de influencia de las minas.

Tras el impulso dado con el Circuito Nacional de Firmes, no fue hasta el Plan de Modernización de la Red de Carreteras Españolas de 1950 que se retomó la mejora de los firmes y pavimentos de la red. Hasta esa década de los 50s, la capa de rodadura de las carreteras, cuando existía, estaba constituida por tratamientos superficiales sobre capas, bien granulares como macadam, bien tratadas con ligantes como el macadam de penetración. Así, dicho Plan de 1950 indica que, de los 70.000 km de la red, sólo 20.937 km (un 30%) tenían rodadura con riegos asfálticos y únicamente un 20 % de los 2.265 km de firmes especiales, algo más de 400 km, eran firmes

⁴ Del Río, M. - Afirmados de asfalto natural- Revista de Obras Publicas nº1928, 76, tomo I (2511): 360-361) (1928)

⁵ Aguilar, M. - Ensayos de firmes especiales para carreteras- Revista Obras Públicas nº2439 (1925)

de tipo bituminoso en los que se encontraban, bien macadam de penetración hecho in situ con alquitrán o betunes fluidificados, bien mezclas tipo tarmacado también hechas con alquitrán o bien mezclas abiertas en frío con betunes fluidificados o emulsión. Las mezclas asfálticas se hacían con plantas muy rudimentarias, con alimentación cuasi manual de áridos mediante carretillas, dosificando el betún en volumen.

Los aglomerados en caliente en central

Tras el Plan de modernización de 1950, la implantación de las mezclas asfálticas en caliente fabricadas en central no se produjo realmente en nuestro país hasta después de la liberalización de las importaciones de equipos, estimulada por el Tratado con Estados Unidos de 1953, a partir del cual España empezó a tener acceso a tecnologías como las que ya se usaban en Estados Unidos, tanto en cuanto a plantas de fabricación como a equipos de extendido. También, derivado de dicho convenio, se produjo un intenso intercambio tecnológico (viajes de estudios a EEUU de técnicos españoles) y el desarrollo de la red de laboratorios de ensayos provinciales a partir del primer Laboratorio del Transporte de la Escuela de Caminos creado a mediados de los años 40s (posteriormente denominado de Transporte y Mecánica del Suelo) y su sección de pavimentos, dando lugar a la consiguiente normalización de ensayos y métodos de dosificación de mezclas.

La eclosión y asentamiento de las mezclas en caliente

No obstante, el gran despliegue de las mezclas asfálticas en caliente se produjo con el programa de la Red de Itinerarios Asfálticos (REDIA) 1967-1971, que se terminó en 1975 y entre cuyos objetivos se encontraba "la extensión de capas de aglomerado asfáltico a lo largo de toda la calzada como refuerzo de firme y dando continuidad a la capa de rodadura" para lo cual el firme se terminaba con unas capas de mezclas bituminosas en caliente de 12 cm de espesor. Estas mezclas seguían las pautas de diseño y formulación habituales en Estados Unidos, marcadas por el Asphalt Institute, que se recogían en su ampliamente difundido y traducido Manual del Asfalto. Eran composiciones de granulometría cerrada con altos contenidos de mortero y ligante, siendo típico el empleo de los tipos IV o V en rodaduras y del tipo III en intermedias.

Estas mezclas flexibles, resistentes a fatiga, duraderas frente a envejecimiento pero con dudosa resistencia frente a las deformaciones plásticas, se revelaron pronto poco adaptadas a las circunstancias españolas, con cargas por eje mucho más altas, velocidad más reducida de nuestros sobrecargados camiones y un clima con temperaturas muy elevadas en verano, lo que produjo la aparición de espectaculares roderas en muchas de estas carreteras, especialmente en zonas de rampas con tráfico muy canalizado, lento y sobrecargado.

Ello motivó un movimiento pendular, pasando de estas mezclas escasas en huecos con abundante mortero y ricas en betún, aunque muy durables por otra parte, a mezclas con alto esqueleto mineral y áridos más angulosos y duros, mayor contenido de filler y menor dotación de betún, con

algo más de huecos. Al mismo tiempo, se pretendía formularlas con un ensayo más adaptado para caracterizar el problema de las roderas como era el ensayo de pista, sin basarse únicamente en el ensayo de deformaciones plásticas (como se auto titulaba el Ensayo Marshall). Por último, se regularía la elección del tipo de ligante en función de la zona térmica estival de la aplicación.

Estas nuevas mezclas se reglamentaron en la importante modificación normativa recogida en el primer PG-3 (Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes): el PG-3/75, publicado en 1976. Supuso un hito que marcó las bases y filosofía de las mezclas y ligantes de que disponemos hoy día, pasando a cuatro grupos de mezclas: abiertas(A), gruesas (G), semidensas (S) y densas (D).

Pero como era lógico, este movimiento pendular llevó a mezclas que, efectivamente, no tenían ninguna rodera, pero sí escasa durabilidad en cuanto a resistencia a fisuración térmica o fisuración por envejecimiento, debido a su escasa dotación de betún.

En general, había pánico a mezclas escasas de huecos, por lo que estas se diseñaban con poco mortero. El pánico a las roderas provocó esta reacción y, muchos años después, se ha intentado, pero quizás no se ha llegado todavía, a un término medio en cuanto aumento de dotaciones de betún y espesor de la película del ligante para que las mezclas duren más y tengan mayor resistencia a envejecer y a fatiga.

Una de las mezclas prototipo de esta filosofía, alta rigidez y escasa flexibilidad, eran las típicas capas de base, mezclas G25, un conjunto de piedras más o menos unidas con algo de mortero, con alta permeabilidad en huecos, quizás próximas a la filosofía de mezclas abiertas. No obstante, esas mezclas abiertas tenían un gran papel, teniendo en cuenta que eran bastante drenantes, eliminaban el agua que se colaba por el firme para que no entrase en las inferiores permitiendo que saliese lateralmente.

A principios de los años 80s aparecieron las mezclas porosas o drenantes, que se incorporaron a la modificación del Pliego de 1989.

Posteriormente, las empresas empezaron a desarrollar las mezclas discontinuas, que se incorporaron a la normativa en la Orden Circular OC 5/2001, en la que se establecieron dos grupos. Por un lado, las finas (F) con alta macrotextura pero impermeables y con bastante mortero y algo susceptibles de perder macrotextura con tráficos pesados, siendo una aplicación típica la capa de 3 centímetros de espesor; por otro, las mezclas monogranulares (M) que, aplicables en espesores de 3 a 2 cm, eran semidrenantes pues tenían huecos en torno a un 14 por ciento. Desde la modificación normativa de 2008 (OC 24/2008) las mezclas discontinuas se integran en las BBTM, con apellidos A o B según el grupo.

Dicha modificación endurece algunas prescripciones en cuanto a materiales y empleo. Finalmente en 2014 se adaptan totalmente las mezclas bituminosas en caliente a la normativa armonizada europea en la serie de normas UN-EN 13108

Las mezclas en frío

Aunque en mezclas asfálticas en carreteras hubo un predominio de mezclas en caliente en central, las mezclas en frío han tenido una gran tradición, empleo y buen comportamiento en toda la red secundaria de carreteras. Estas mezclas son la base de la gran mejora de esta red con un comportamiento flexible, con características de auto reparación, superando la incómoda rodadura que solían tener los tratamientos superficiales.

A pesar de que a principios del siglo XX ya habían sido inventadas las emulsiones aniónicas de betún de petróleo, en la primera mitad de dicho siglo se hacían mezclas “almacenables” para colocar en frío, fabricadas calentando áridos y con alquitranes o betunes fluidificados como ligantes.

La aparición de las emulsiones catiónicas en 1951 supuso un gran avance por su menor sensibilidad a la humedad y tipo de áridos, reemplazando rápidamente a las aniónicas y dando lugar a avances en la fabricación y empleo de mezclas en frío, en centrales sencillas y fácilmente transportables. En sus inicios hubo curiosas experiencias, como las realizadas en Orense fabricando la emulsión a pie de obra para reparaciones como tratamiento superficial o elaboración de aglomerados para bacheos⁶.

Las lechadas bituminosas o microaglomerados en frío comenzaron su andadura en España a principio de los 60s, entonces conocidas como “slurry”.

Las mezclas en frío se incorporaron también al PG-3/75.

1.2. LAS QUE SE QUEDARON POR EL CAMINO

El PG-3/75 también contemplaba los Macadam hechos por penetración de ligante, que además permitía alquitrán de hulla, que posteriormente fue eliminado de la normativa.

Por ello, cuando se hagan rehabilitaciones de las carreteras antiguas, pueden encontrarse este tipo de capas, aparentemente mezclas bituminosas, pero que al contener alquitrán, no deben someterse a ningún tratamiento en caliente por la emisión de compuestos orgánicos volátiles perjudiciales para la salud; el tratamiento idóneo será estabilizarlas con tratamientos en frío, con ligantes hidráulicos sin aportación de calor, aunque deberá evaluarse su posible capacidad de generar lixiviados perjudiciales.

⁶ Inaraja Arizti, R. - Las emulsiones catiónicas fabricadas a pie de obra. - Revista de Obras Publicas Nº 2669 (1962)

2. MATERIALES CONSTITUYENTES DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS

2.1. ÁRIDOS

2.1.1. Antecedentes de los áridos

Ya en Babilonia, en el siglo V antes de Jesucristo, se construye la vía Sacra con grandes losas asentadas sobre cimiento de ladrillos recubiertos de betún y rejuntados con una especie de mortero asfáltico. En las ciudades romanas, las calles y aceras estaban pavimentadas con grandes enlosados, que todavía pueden verse en las ruinas de Pompeya. Tampoco se puede dejar de citar la enorme aportación que a los firmes viarios supusieron las estructuras de las calzadas romanas, las menos fotogénicas carreteras interurbanas pero extensísimas por todo el Imperio, con una base de piedra, sobre la que se disponía unos rellenos granulares y terminada con una o dos capas de zahorras naturales como rodadura. Estas supusieron una enorme demanda de piedra y áridos en sus más de 100.000 kms de red y serían los antecedentes de las nuevas estructuras de firmes del XVIII (Trésaquet) y XIX (Telford y McAdam)

Durante la Edad Media y los principios de la Moderna no hubo apenas progreso; pero fue a partir del siglo XIX cuando hubo una nueva necesidad debido a la aparición del automóvil, con una exigencia de firmes más resistentes que diesen al tráfico mayor seguridad y evitasen el polvo de los caminos.

2.1.2. La puesta en obra

Inicialmente los pavimentos con áridos se clasificaban por su naturaleza, pero enseguida se denominaron según su permanencia: *pavimentos no permanentes*, que necesitaban una conservación sistemática (como ejemplo un tratamiento superficial) y *pavimentos permanentes*, como el adoquinado. Posteriormente se hizo otra clasificación que dependía de si la piedra era partida, labrada o artificial.

La piedra que se extraía de las canteras tenía que reducirse mediante machaqueo al tamaño adecuado para su utilización en los distintos firmes, preparando piedra partida, gravilla o arena. La preparación de dicha piedra partida o gravilla se hacía inicialmente a mano y posteriormente de forma mecánica.



Figura 2. Evaluación de la técnica de machaqueo. A la izquierda machaqueo manual, a la derecha, instalación de machaqueo actual

Las principales rocas utilizadas para la construcción de firmes en España son: calizas, cuarcitas, rocas porfídicas, granito, ofitas, diabasas, basaltos y piedras artificiales (adoquines, de escorias y ladrillos). Para su control se realizaban ensayos como: desgaste por rozamiento, coeficiente de calidad máximo, resistencia a compresión, densidad, composición granulométrica, peso específico, dureza, coeficiente de friabilidad, poder de ligante.

2.1.3 Características de los áridos para mezclas bituminosas.

A lo largo de los años, las características exigidas a los áridos han ido cambiando en función de las necesidades existentes y de la evolución de las diferentes tecnologías, tanto en las mezclas bituminosas como en los vehículos. Otro factor que ha influido directamente en la evolución de los requisitos de los áridos ha sido el tráfico, su tipo y su intensidad, que ha provocado que se modifiquen los requerimientos.

Los requisitos actuales exigidos a los áridos para mezclas bituminosas vienen recogidos, para el caso de carreteras de la red estatal, en los artículos 542, 543 y 544 del PG-3. Se podrán emplear áridos de origen natural, artificial o reciclado como el material procedente del fresado. En general, deberán disponer del marcado CE con un sistema de evaluación de la conformidad 2+.

Se realiza la clasificación del árido en base a su granulometría, en:

- Árido grueso.- es la parte del árido total retenida en el tamiz 2 mm; sus características más importantes son su angulosidad (porcentaje de caras de fractura), forma (índice de lajas), resistencia a la fragmentación (coeficiente de los ángeles), resistencia al pulimento (coeficiente de pulimento acelerado), limpieza (contenido de impurezas).

- Árido fino.- es la parte del árido total cernida por el tamiz 2 mm y retenida por el tamiz 0,063 mm; sus características más importantes son la limpieza, resistencia a la fragmentación.
- Polvo mineral.- es el árido cuya mayor parte pasa por el tamiz 0,063 mm; sus características más importantes son la granulometría, finura y actividad.

Pero, tal y como se comentaba anteriormente, los requisitos exigidos han ido cambiando. En los cuadros siguientes se puede ver la evolución de dichas exigencias a lo largo de los años. Los cambios producidos han ido siempre orientados a mejorar la calidad final de los áridos, empleados. Los parámetros que más destacan por su importante evolución están relacionados con la resistencia a la fragmentación del árido, su forma y también su resistencia al pulimento.

Habría que destacar que la aparición de las mezclas drenantes y, posteriormente, las mezclas discontinuas para capas finas, provoca un incremento de las necesidades de la calidad del árido, especialmente en su forma, así como también en su resistencia a la fragmentación (al emplearse en capas finas con rozamiento interno árido-árido) y especialmente en la resistencia al pulimento (al incrementarse el tráfico pesado, se hace imprescindible que el árido resista el paso de los vehículos puliéndose lo menos posible).

Tablas de requisitos de los áridos a emplear en mezclas bituminosas

ÁRIDO GRUESO

PG3 75 (Art.542)	O.C. 299/1989 (Art.542)	O.C. 322/1997 (Art.543)	O.C. 5/2001 (Art. 542 y 543)	O.FOM891/200 4 (Art. 542 y 543)	O.C 24/2008 (Art. 542 y 543)	O.FOM2523/201 4 (Art. 542 y 543)																																	
Tamaño	D > 2,5 mm	=====	D > 2,0 mm	=====	=====	=====																																	
Caras fractura	>75%	<table><tr><td>Tráfico</td><td>Rod</td><td>Base</td></tr><tr><td>T0,T1</td><td>Int</td><td>>90%</td></tr><tr><td>T2</td><td>>90%</td><td>>75%</td></tr><tr><td>T3,T4</td><td>>75%</td><td></td></tr></table>	Tráfico	Rod	Base	T0,T1	Int	>90%	T2	>90%	>75%	T3,T4	>75%		=====	=====	=====	<table><tr><td>Tráfico</td><td>Rod</td><td>Int</td></tr><tr><td>T0,T1,T2</td><td>100%</td><td>100%</td></tr><tr><td>T3,T4</td><td>>70%</td><td>>70%</td></tr></table>	Tráfico	Rod	Int	T0,T1,T2	100%	100%	T3,T4	>70%	>70%												
Tráfico	Rod	Base																																					
T0,T1	Int	>90%																																					
T2	>90%	>75%																																					
T3,T4	>75%																																						
Tráfico	Rod	Int																																					
T0,T1,T2	100%	100%																																					
T3,T4	>70%	>70%																																					
Desgaste L.A.	Base < 30 Int + Rod < 25 Drenante < 20	<table><tr><td>Tráfico</td><td>F</td><td>M</td></tr><tr><td>T0,T1,T2</td><td><20</td><td><15</td></tr><tr><td>T3,T4</td><td><25</td><td><25</td></tr></table>	Tráfico	F	M	T0,T1,T2	<20	<15	T3,T4	<25	<25	<table><tr><td>Tráfico</td><td>Bas.Int.</td><td>Rod co n.</td><td>Dre</td><td>F,M,</td></tr><tr><td>T00,T0</td><td><25</td><td><20</td><td><15</td><td><20/15</td></tr><tr><td>T1,T2</td><td><30/25</td><td><25</td><td><20</td><td><20/15</td></tr><tr><td>T3,T4</td><td><30/25</td><td><25</td><td><20</td><td><25</td></tr></table>	Tráfico	Bas.Int.	Rod co n.	Dre	F,M,	T00,T0	<25	<20	<15	<20/15	T1,T2	<30/25	<25	<20	<20/15	T3,T4	<30/25	<25	<20	<25	=====	=====	=====				
Tráfico	F	M																																					
T0,T1,T2	<20	<15																																					
T3,T4	<25	<25																																					
Tráfico	Bas.Int.	Rod co n.	Dre	F,M,																																			
T00,T0	<25	<20	<15	<20/15																																			
T1,T2	<30/25	<25	<20	<20/15																																			
T3,T4	<30/25	<25	<20	<25																																			
C.P.A.	Tráfico pesado >0.45 Otros tráficos > 0.40	<table><tr><td>Tráfico</td><td>C.P.A</td></tr><tr><td>T0, T1</td><td>>0.50</td></tr><tr><td>T2</td><td>>0.45</td></tr><tr><td>T3, T4</td><td>>0.40</td></tr></table>	Tráfico	C.P.A	T0, T1	>0.50	T2	>0.45	T3, T4	>0.40	<table><tr><td>Tráfico</td><td>S.D</td><td>F.M</td></tr><tr><td>T00</td><td>>0.55</td><td>>0.55</td></tr><tr><td>T0, T1</td><td>>0.50</td><td>>0.50</td></tr><tr><td>T2</td><td>>0.45</td><td>>0.50</td></tr><tr><td>T3, T4</td><td>>0.40</td><td>>0.45</td></tr></table>	Tráfico	S.D	F.M	T00	>0.55	>0.55	T0, T1	>0.50	>0.50	T2	>0.45	>0.50	T3, T4	>0.40	>0.45	=====	<table><tr><td>Tráfico</td><td>S.D</td></tr><tr><td>T00,T0</td><td>>56</td></tr><tr><td>T1 a</td><td>>50</td></tr><tr><td>T31</td><td></td></tr><tr><td>T32,T4</td><td>>44</td></tr></table>	Tráfico	S.D	T00,T0	>56	T1 a	>50	T31		T32,T4	>44	=====
Tráfico	C.P.A																																						
T0, T1	>0.50																																						
T2	>0.45																																						
T3, T4	>0.40																																						
Tráfico	S.D	F.M																																					
T00	>0.55	>0.55																																					
T0, T1	>0.50	>0.50																																					
T2	>0.45	>0.50																																					
T3, T4	>0.40	>0.45																																					
Tráfico	S.D																																						
T00,T0	>56																																						
T1 a	>50																																						
T31																																							
T32,T4	>44																																						
Lajas	Tráfico pesado <35 Otros tráficos <30	<table><tr><td>Tráfico</td><td>F</td><td>M</td></tr><tr><td>T0,T1,T2</td><td><25</td><td><20</td></tr><tr><td>T3,T4</td><td><30</td><td><30</td></tr></table>	Tráfico	F	M	T0,T1,T2	<25	<20	T3,T4	<30	<30	<table><tr><td>Tráfico</td><td>G.S.D</td><td>Dre</td><td>F.M.</td></tr><tr><td>T00</td><td><20</td><td><20</td><td><20</td></tr><tr><td>T0,T1</td><td><25</td><td><25</td><td><20</td></tr><tr><td>T2</td><td><30</td><td><25</td><td><20</td></tr><tr><td>T3,T4</td><td><35</td><td><25</td><td><25</td></tr></table>	Tráfico	G.S.D	Dre	F.M.	T00	<20	<20	<20	T0,T1	<25	<25	<20	T2	<30	<25	<20	T3,T4	<35	<25	<25	=====	=====	=====				
Tráfico	F	M																																					
T0,T1,T2	<25	<20																																					
T3,T4	<30	<30																																					
Tráfico	G.S.D	Dre	F.M.																																				
T00	<20	<20	<20																																				
T0,T1	<25	<25	<20																																				
T2	<30	<25	<20																																				
T3,T4	<35	<25	<25																																				
Adhesividad	- Mezclas A: >95% -Mezclas D.S.G: Inm/Comp <25%	=====	Desaparecen especificaciones. Se estudia la adhesividad sobre la mezcla.	=====	=====	=====																																	
Impurezas	<0.5%	=====	=====	=====	=====	=====																																	

(*) ===== No se modifican las especificaciones con respecto a la normativa anterior.

ÁRIDO FINO

	PG3 75 (Art.542)	O.C. 299/1989 (Art.542)	O.C. 322/1997 (Art.543)	O.C. 5/2001 (Art. 542 y 543)	O.FOM89/1/2004 (Art. 542 y 543)	O.C 24/2008 (Art. 542 y 543)	O.FOM2523/2014 (Art. 542 y 543)
Tamaño	0.08 mm<D<2.5 mm	=====	=====	0.063mm<D<2.0 mm	=====	=====	=====
Desgaste L.A.	Procedente áridos DLA indicado árido grueso	=====	Procedente áridos DLA < 25%	=====	=====	=====	=====
Adhesividad	-Índice adh > 4 -lnm/Comp < 25%	=====	=====	Desaparecen especificaciones. Se estudia la adhesividad sobre la mezcla.	=====	=====	=====

POLVO MINERAL

	PG3 75 (Art.542)	O.C. 299/1989 (Art.542)	O.C. 322/1997 (Art.543)	O.C. 5/2001 (Art. 542 y 543)	O.FOM89/1/2004 (Art. 542 y 543)	O.C 24/2008 (Art. 542 y 543)	O.FOM2523/2014 (Art. 542 y 543)
Tamaño	D < 0.08 mm	=====	=====	D < 0.063 mm	=====	=====	=====
Finura y actividad	-Densidad aparente entre 0.5-0.8 g/cm³ -Coeficiente emulsibilidad <0.6	=====	=====	-Densidad aparente entre 0.5-0.8 g/cm³	=====	=====	=====

ÁRIDO COMBINADO

	PG3 75 (Art.542)	O.C. 299/1989 (Art.542)	O.C. 322/1997 (Art.543)	O.C. 5/2001 (Art. 542 y 543)	O.FOM89/1/2004 (Art. 542 y 543)	O.C 24/2008 (Art. 542 y 543)	O.FOM2523/2014 (Art. 542 y 543)
Plasticidad	Base. E.A > 40 Rod/int.E.A >45	E.A > 50 Azul metileno < 1	=====	E.A > 50 Azul metileno <10 * Y E.A. > 40	=====	=====	E.A. > 55 Azul metileno <7 g/kg Y E.A. > 45

2.1.4. Polvo mineral

Polvo mineral es el árido cuya mayor parte pasa por el tamiz 0,063 mm (norma UNE EN 933-2); sus características más importantes son la granulometría, finura y actividad, cuyo objetivo es asegurar la homogeneidad del producto.

Puede proceder del propio árido captado por el filtro de mangas durante el proceso de calentamiento en planta, denominándose filler de recuperación, o de procesos industriales que consiguen materiales homogéneos, al que se denomina filler de aportación, y en todos los casos debe cumplir:

POLVO MINERAL

	PG3 75 (Art.542)	O.C. 5/2001 (Art. 542 y 543)
Tamaño	D < 0.08 mm	D < 0.063 mm
Finura y actividad	-Densidad aparente entre 0.5-0.8 g/cm ³ -Coeficiente emulsibilidad <0.6	-Densidad aparente entre 0.5-0.8 g/cm ³

El polvo mineral de aportación, en función de su composición o naturaleza, puede mejorar algunas propiedades de la mezcla bituminosa. Se suelen emplear para mejorar la resistencia a la acción del agua de las mezclas bituminosas, como es la adhesividad, aunque también pueden afectar a la reología del mástico, y por lo tanto al comportamiento de la mezcla (por ejemplo, el cemento puede rigidizar algo las mezclas, mientras que las cales pueden mejorar la adhesividad árido-ligante además de incrementar la flexibilidad del mástico).

Los polvos minerales más habituales empleados en la fabricación de las mezclas bituminosas en caliente son el carbonato cálcico o el cemento, y en algunas ocasiones con excelentes resultados también la cal, utilizados con el objetivo de sustituir una parte del polvo mineral con supuesta baja calidad que procede de los propios áridos. Por ejemplo, el empleo de cales o cenizas volantes ya quedan reflejados en un documento del año 1965, donde el Ingeniero de Caminos Canales y Puertos D. Juan Antonio Fernández del Campo los citaba como empleados en la construcción de pavimentos flexibles en Francia.

Estos productos se almacenan en uno o varios silos individuales en las plantas y son dosificados en peso por básculas independientes de los áridos y/o de los betunes, incorporándose posteriormente al mezclador con la secuencia de vaciado elegida. El filler de aportación, a pesar de no ser sometido al proceso de calentamiento de los áridos, se mezclan sin problemas con los áridos y con el ligante.

2.2. BETÚN

2.2.1. *Evolución histórica del uso del betún*

Si bien su uso se hizo extensivo para carreteras a partir del siglo XX, el betún viene utilizándose por el hombre desde mucho tiempo atrás, a partir de depósitos de asfalto (betún) natural, en los que un material parecido al que ahora utilizamos se encontraba fácilmente accesibles para el ser humano. Así, desde hace más de 5000 años, el betún se ha venido utilizando de una u otra manera como impermeabilizante o agente aglomerante⁷.

De esta forma, los primeros usos registrados fueron en el imperio Sumerio, 3500 años antes de Cristo. También, excavaciones arqueológicas indican el amplio uso del betún en Mesopotamia y valle del Indo, donde se han encontrado depósitos de agua construidos con betún como agente aglomerante e impermeabilizante entre los bloques de piedra, así como núcleos de betún en los muros; todo ello ejecutado entre los 3200 y 540 años antes de Cristo.

Tal y como ya se ha comentado anteriormente, durante el siglo XIX comienza el empleo de roca asfáltica en pavimentación de suelos de puentes, aceras y calles y, en su segunda mitad aparecen las mezclas asfálticas con betún. Pero quizás uno de los cambios más importantes en el empleo del betún se produce a principios del siglo XX, en Estados Unidos, donde se empieza a obtener betún de la destilación del petróleo (aproximadamente 20.000 toneladas al año).

A partir de 1920 se comienza a producir betún en Europa por destilación de crudo de petróleo y su consumo en carreteras crece de manera significativa a lo largo de siglo XX. Actualmente casi la totalidad del betún utilizado en carreteras proviene de este origen, siendo en el caso de España posiblemente el 100%.

El betún es un componente natural del petróleo en el que existe en disolución. A través del refinado, el crudo es destilado separando sus diversas fracciones obteniéndose entre ellas el betún. Este material presenta unas interesantes propiedades para la construcción de pavimentos, ya que es un aglomerante resistente, muy adhesivo, altamente impermeable y duradero. Su comportamiento reológico y susceptibilidad térmica permiten envolver los áridos a determinada temperatura y adquirir un comportamiento resistente a las cargas del tráfico una vez extendida la mezcla asfáltica.

⁷ The asphalt Institute. 1982.Manual del Asfalto.

Los ligantes bituminosos comúnmente utilizados en España tienen una consistencia a temperatura ambiente (penetración) entre 35 y 70 décimas de mm, divididas en dos clases, 35/50 y 50/70, las más utilizadas. También es posible utilizar betunes duros para pavimentación, con penetraciones menores de 25 décimas de mm, con el objeto de conseguir mezclas de módulo de rigidez elevado.

Ligantes más blandos se utilizan fundamentalmente en la elaboración de emulsiones bituminosas, los denominados cut-backs (no utilizados en España actualmente) y como materia prima en la fabricación de productos derivados como los betunes modificados.

Desde una perspectiva de evolución histórica, dos son los hitos más destacados en el desarrollo de los ligantes bituminosos:

2.2.2. Modificación del betún

La modificación de betunes viene realizándose prácticamente durante todo el siglo XX, (ya en 1902 en Francia se usó caucho para modificar el betún) pero su desarrollo empezó a ser significativo a partir de los años 60 y, en España, a finales de la década de los 70.

En general, con la adición de modificadores se pretende alterar el comportamiento reológico del betún convencional, mejorando así el comportamiento de estos ligantes en la carretera. Permite la fabricación de mezclas asfálticas de mayores prestaciones que no podrían hacerse con la durabilidad adecuada sin utilizar estos ligantes.

Como modificadores, podríamos definir diferentes grupos:

1. Polímeros. Son los más utilizados ya que permiten una mejora evidente del comportamiento del material. Podemos distinguir:
 - o Betunes homogéneos en los que la mezcla betún polímero se comporta como un material de una sola fase. Entre los polímeros empleados se pueden distinguir varios, siendo los más destacados los modificadores elastoméricos (SBR, SBS...) y los denominados termoplásticos (EVA, EMA). Actualmente los más utilizados generalmente son los elastoméricos.
 - o Betunes de fases no homogéneas en los que pueden distinguirse diferentes fases. Es el caso de los betunes modificados con caucho procedente de neumático al final de vida útil (NFVU), donde las partículas de caucho se encuentran parcialmente disueltas en el betún.

2. Otros modificadores: También son o han sido utilizados, para mejorar alguna de las propiedades del betún. Como más destacados tenemos:
 - o Modificadores químicos, como por ejemplo el azufre, utilizado para aumentar la rigidez del material.
 - o Modificadores reológicos como ceras de alto peso molecular, que permiten reducir la viscosidad del ligante a altas temperaturas
 - o Mejoradores de adhesividad, que permiten una mayor resistencia a la acción del agua en relación con determinados áridos
 - o Tensoactivos para mejorar la mojabilidad de los áridos y poder disminuir la temperatura necesaria para fabricar las mezclas asfálticas.

El efecto de cada aditivo o tipo de polímero es diferente. Es importante destacar que estos efectos realmente dependerán del tipo de polímero utilizado (incluso dentro en un mismo tipo genérico, por ejemplo SBS, existen diferencias, por ejemplo radial, lineal, etc.), la cantidad, el betún de partida utilizado, etc.

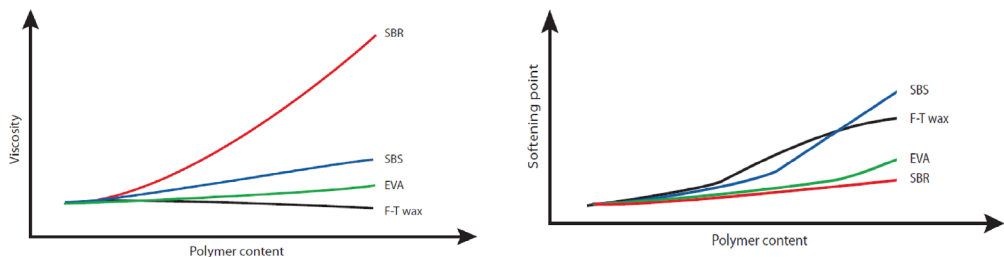


Figura 3. . A la izquierda, variación de la viscosidad con el contenido de polímero. A la derecha, variación del punto de reblandecimiento con el contenido de polímero⁸

En los últimos años, destacan la aparición de los siguientes desarrollos y modificaciones del betún.

1. Betunes modificados con polímero de altas prestaciones, capaces de contener un elevado porcentaje de polímero elastomérico, permitiéndoles desempeños muy superiores a los betunes modificados habituales.

⁸ Asphalt academy. November 2007. The use of modified bituminous binders in road construction.

2. Betunes para mezclas a baja temperatura, en los que suelen distinguirse los que utilizan reductores de viscosidad para facilitar la mezcla a temperaturas más bajas, o los que incorporan paquetes de tensoactivos diseñados para mejorar la “mojabilidad” del betún con el árido.
3. Los aditivos para reutilización de material fresado, bien procedentes del petróleo o de otras químicas orgánicas como la del pino, que, si bien son utilizados desde hace tiempo, es interesante destacar por el papel cada vez más importante que los reciclados deberían tener en la construcción de carreteras.

2.2.3. Emulsiones bituminosas

En cuanto a las emulsiones, su desarrollo ha sido paralelo al desarrollo de sus diferentes aplicaciones, como los riegos auxiliares, la estabilización de suelos, los tratamientos superficiales, las mezclas abiertas, los microaglomerados en frío, la impermeabilización de tableros de puente, etc. Pero su desarrollo más importante pudo producirse a partir del 1974, cuando la crisis del petróleo obligó a optimizar todos los procesos productivos.

Posteriormente surgen las emulsiones modificadas, entre las que podemos diferenciar las modificadas a “posteriori” (es decir emulsionan un betún convencional para luego añadir polímero disuelto a la emulsión) y las emulsiones en las que es un betún modificado el que es emulsionado.

En los últimos años destaca el desarrollo de tres tipos de emulsiones:

1. Termoadherentes para riegos de adherencia, cuyos betunes tienen puntos de reblandecimiento mayores, impidiendo que quede pegado a las ruedas del tráfico de obra. Existen de betún convencional y modificadas.
2. Emulsiones para mezclas templadas, que contemplan la fabricación de todo tipo de mezclas asfálticas y, por tanto, en función de la aplicación, así serán diseñadas. Destacan las emulsiones modificadas para mezclas templadas de altas prestaciones, con las que se pretenden fabricar mezclas asfálticas lo más similares posible a las mezclas en caliente, como BBTM.
3. Y es necesario destacar el importante papel de las emulsiones para microaglomerados en frío, convencionales y modificadas, al ser una técnica en auge para todo tipo de carreteras, incluso en aeropuertos, para operaciones de mantenimiento.

2.3. ADITIVOS EN MEZCLAS BITUMINOSAS

Antes de iniciar la descripción de la evolución de los aditivos empleados en mezclas bituminosas, es necesario definir que se considera un “aditivo” en este tipo de materiales. Toda mezcla bituminosa está compuesta por áridos (incluido el polvo mineral) y ligante. Para mejorar el comportamiento de algunas características de dichos productos, se vienen empleando, desde hace décadas, materiales que, adicionados a los anteriores, son capaces de modificar las características del producto final. Estos productos son denominados, de forma general, “aditivos”.

Los aditivos pueden ser líquidos o sólidos, en forma de polvo o granulometrías mayores, y pudiendo añadirse tanto al ligante antes de su incorporación a la mezcla (adición por vía húmeda) como al mezclador, considerándose esta segunda opción como vía seca.

Existen infinidad de aditivos, que han ido evolucionando a lo largo de los años, que están especialmente diseñados para mejorar características específicas de las mezclas fabricadas. Algunas de las características que se pueden mejorar son:

- La rigidez de las mezclas bituminosas, con el objetivo de mejorar la resistencia a las deformaciones plásticas.
- La adhesividad árido-ligante para incrementar la resistencia a la acción del agua.
- El rejuvenecimiento de ligantes envejecidos mejorando su flexibilidad.
- La flexibilidad del ligante para mejorar características como resistencia a la fisuración por diferentes causas.
- La homogeneidad de la mezcla, evitando escurrimientos y/o exudaciones.
- La resistencia al envejecimiento, mejorando la durabilidad del mismo.

Durante muchos años, investigadores y fabricantes de mezclas bituminosas han experimentado con su modificación, agregando diferentes tipos de aditivos, como pueden ser polvos minerales especiales de aportación, fibras (tanto vegetales como minerales), cauchos y productos químicos de diversa procedencia y composición.

2.3.1. *Pigmentos de colores*

Son diferentes tipos de óxidos (hierro, cromo, titanio, etc...) presentados en formato pulverulento o granular, que modifican la coloración de las mezclas hasta conseguir los tonos deseados. Se trata de una cuestión estrictamente de estética, que aporta una mayor funcio-

nalidad al pavimento asociando determinadas zonas para determinadas actividades o usos, como son los carriles destinados para el uso específico de determinados vehículos (carriles bicicleta). Generalmente requieren la utilización de ligantes sintéticos para producir ese cambio de coloración, aunque para el color rojo se han desarrollado una serie de pigmentos compatibles con el betún negro.

A la hora de dosificar estos productos hay que tener en cuenta su densidad, para, al diseñar volumétricamente las mezclas, incorporar la cantidad adecuada de cada producto. También es importante considerar la granulometría del polvo y su afinidad con el ligante.

Suelen dosificarse en proporciones pequeñas, entre un 0,5% y 3%, dependiendo del color e intensidad deseada. En fabricación se introduce el peso directamente en el mezclador de la instalación para que, aprovechando el movimiento de los materiales y la energía producida por el rozamiento entre las partículas, se alcance la dispersión adecuada en cada caso.

2.3.2. Polvo de caucho procedente de neumáticos al final de su vida útil (NFVU)

El empleo de polvo de caucho procedente de neumáticos al final de su vida útil se lleva empleando en España desde hace más de veinte años, originado principalmente por el problema ambiental que plantea dicho residuo. Su utilización pretende aportar mejoras al comportamiento de las mezclas bituminosas, permitiendo consumir un residuo como producto.

Su adición en las mezclas bituminosas genera una modificación físico-química del ligante bituminoso y, por ende, de la propia mezcla bituminosa. Dicha modificación permite incrementar, incluso de modo importante, la cantidad de ligante en las mezclas bituminosas, mejorando la resistencia a la fisuración y sin aumentar la sensibilidad a las deformaciones plásticas.

El polvo de caucho puede incorporarse a la mezcla por vía seca (directamente al mezclador de la planta) o por vía húmeda (incorporándolo primero al ligante para, posteriormente mezclarlo con los áridos y fabricar la mezcla). En los últimos años han surgido procesos intermedios, en los que se produce primero una digestión del caucho para incorporarlo posteriormente al mezclador.

En función del contenido de caucho sobre el betún se pueden obtener diferentes productos, que aportan a la mezcla final diferentes características. Se pueden obtener ligantes mejorados, modificados o de alta viscosidad estando su empleo regulado en la normativa española.

En cuanto a su empleo en vía húmeda, hay que mantener precauciones tanto en el transporte como en el almacenamiento, ya que el polvo de caucho no llega a disolverse totalmente con el ligante, pudiendo generar problemas de sedimentación tanto en las cubas de transporte como en los tanques de almacenamiento, por lo que se recomienda su empleo con depósitos verticales con agitador y recirculación.

2.3.3. Fibras

La adición de fibras a las mezclas bituminosas ha sido habitual desde mediados del siglo XX. Se han empleado una gran diversidad de tipos de fibras, buscando diferentes objetivos en las mezclas bituminosas.

La utilización de fibras en las mezclas bituminosas no modifica químicamente el betún, pero interviene en las propiedades físicas de la mezcla bituminosa y en las del propio ligante.

Uno de los primeros objetivos buscados fue impulsado por la necesidad de fabricar mezclas con altos contenidos de ligante y con pocos finos, lo que provocaba escurrimiento del betún en la mezcla. Entre estas mezclas destacan las de la familia del tipo SMA empleadas a mediados del siglo XX, originalmente en Alemania.

Así, una de las primeras fibras empleadas como estabilizadora del ligante en la mezcla fue una fibra mineral, la fibra de amianto, que fue pronto desechada por sus implicaciones en materia de salud. Desde entonces se han empleado muchos otros productos (polímeros, materiales pulverulentos, fibras de todo tipo), resultando en la actualidad las fibras de celulosa las más empleadas por sus propiedades funcionales.

Así, durante los años 80 y 90 del siglo pasado se emplearon diferentes tipos de fibras para mejorar algunas de las características de las mezclas bituminosas, como es el caso del poliéster, que puede ser utilizado buscando aumentar la resistencia a fatiga y a deformaciones plásticas gracias a la transferencia de esfuerzos desde la estructura mineral al mástico reforzado con ellas. Estas mejores características quedan demostradas en los trabajos realizados por Putman y Amirkhanian (2004).

También durante esos años, y con el objetivo de mejorar la cohesión de las mezclas bituminosas drenantes, tanto en mezclas en frío como en caliente, se emplearon diferentes tipos de fibras, tanto sintéticas como naturales con el objetivo de mejorar la cohesión de las mezclas bituminosas drenantes. Este hecho fue provocado por el incremento en el empleo de dichas mezclas drenantes, cuya principal debilidad es la cohesión. Así, se emplearon fibras acrílicas tratadas, tanto largas como cortas, procedentes de la industria textil; también se utilizaron fibras de polipropileno en la fabricación de mezclas abiertas en frío. Estas fibras aportaban mejor cohesión a la mezcla, mejorando su resistencia al desprendimiento de los áridos.

2.3.4. Aditivación de las mezclas mediante otros productos

Existen muchos tipos de aditivos que permiten modificar las características de las mezclas bituminosas. En este apartado se van a citar algunos de los más habituales.

En primer lugar, los aditivos para reciclado y reutilización. Estos agentes acostumbran a ser aceites ligeros, de alta penetración y baja viscosidad. Normalmente son productos formulados específicamente para determinados tratamientos, pero pueden también estar formados por mezclas de betunes, emulsiones o betunes modificados de baja viscosidad, escogiéndose en función de sus propiedades reológicas. Normalmente, los productos de marcas comerciales están en forma emulsionada o en aceites en fase no emulsionada, compuestos por fracciones maltenas y asfaltenas seleccionadas derivadas del crudo.

La tendencia actual es incorporar más asfalto reciclado (se suele denominar como RAP, siglas de *Reclaimed Asphalt Pavement*) en las nuevas mezclas bituminosas en caliente para recuperar el valor de las materias primas no renovables existentes en el fresado, tanto el ligante como los áridos. Para poder recuperar las propiedades de dicho ligante se hace necesario el empleo de aditivos que devuelvan parte de dichas propiedades para ser aprovechado en un nuevo firme, sobre todo cuando los porcentajes de RAP en la mezcla final son muy importantes, permitiendo obtener mezclas con las mismas características que las mezclas fabricadas con materiales vírgenes.

Estos materiales pueden ser empleados tanto en el proceso de reciclado en frío, como en mezclas templadas, semicalientes y calientes, formulándose para cada tipo de aplicación en función también de las características del ligante envejecido.

Otra vertiente cada vez más extendida en el uso de aditivos es el empleo de los mismos para reducir las temperaturas de fabricación y compactación de las mezclas bituminosas en caliente, obteniéndose mezclas a menor temperatura. Existen diversas tecnologías para poder obtener este tipo de resultado. Entre ellas destacan:

- Aditivación del ligante mediante la incorporación de diferentes tipos de ceras, que cambian la reología del betún, permitiendo que el mezclado y la compactación se realicen a menor temperatura.
- Incorporación de diferentes productos químicos, que incrementan la mojabilidad del betún sobre los áridos, mejorando la envuelta y la trabajabilidad de la mezcla, permitiendo poder trabajar, también, a menores temperaturas.
- Una tecnología que se está empleando en los últimos años en la fabricación de mezclas es la espumación del ligante. En algunos casos esta espumación se realiza mediante medios mecánicos (incorporando pequeñas cantidades de agua al ligante a altas presiones) o mediante la incorporación de productos que liberan agua, que poseen en su composición, cuando se mezclan con el betún caliente. Estos productos son los filleres hidrofílicos, las arenas húmedas o las zeolitas.

Finalmente, existen un grupo de aditivos, más orientados a la acción química sobre el ligante y/o la mezcla, que son específicamente formulados para mejorar características específicas

de la mezcla. Por ejemplo, existen aditivos que mejoran la adhesividad árido-ligante, obteniendo mezclas con mayor resistencia a la acción del agua. O también productos que mejoran la resistencia a la acción de los disolventes sobre las mezclas bituminosas (productos anticarburantes).

También existen aditivos para incrementar la rigidez de la mezcla, o para conseguir que la mezcla sea más hidrofóbica.

En definitiva, estos aditivos enumerados son un ejemplo de los que se pueden encontrar en el sector. El campo de los aditivos con interacción química inicia su andadura y se espera una evolución importante en este campo en los próximos años.

3. FABRICACIÓN DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE

3.1. PRIMERAS PLANTAS Y SU EVOLUCION

A partir de 1870, cuando aparece la primera mezcla asfáltica moderna, comienza la evolución de las plantas de fabricación de mezclas en caliente, desde las que realizan únicamente las operaciones de secado y mezclado. Durante los primeros años del siglo XX dichas instalaciones se desarrollan hasta conseguir, en la década de los años treinta del siglo XX, plantas capaces de fabricar 800-1000 toneladas en una misma jornada de trabajo. Las primeras instalaciones estaban compuestas por elementos muy básicos, con los dispositivos mecánicos existentes en esa época, capaces de calentar y mezclar los áridos junto con el ligante, diseñadas para pequeñas producciones y empleando sistemas de dosificación con escasa precisión: el árido era dosificado en cajones y el ligante en cubetas, que se vertían sobre un mezclador que depositaba la mezcla sobre vagones tirados por caballos. Los áridos eran introducidos manualmente, lo que condicionaba la posibilidad de emplear mayor número de fracciones, hasta que se emplean las primeras tolvas alimentadoras en frío en torno al año 1900. En los primeros años se utilizaba madera como combustible para el calentamiento de los materiales, siendo una industria muy contaminante. En 1901, la firma Warren Brothers presenta la que se considera primera planta en caliente con los elementos de una planta moderna, a falta de tolvas de alimentación en frío y sistema de depuración de polvo.

Con el paso de los años fueron evolucionando, modificando las instalaciones e introduciendo nuevos elementos mecánicos y electrónicos que permitieron mejorar todo el proceso. Los áridos comienzan a ser alimentados en tolvas de materiales con palas cargadoras, pudiendo así incorporar mayor cantidad de material y posibilitar manejar de forma controlada un número mayor de fracciones y/o naturaleza de materiales, siendo en la década de los treinta del

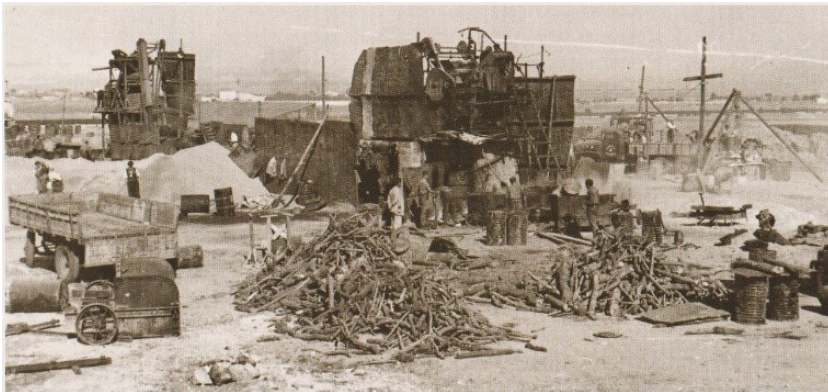


Figura 4. Foto primeras plantas de mezcla en caliente.(circa 1870)

siglo XX cuando se incorporan cintas transportadoras para introducir los áridos en la planta. En los años treinta y cuarenta se incorporan sistemas de aspiración de gases del tambor secador, con el objetivo de mejorar la efectividad del proceso. Este proceso arrastra una parte de los finos que llevan los áridos, los cuales eran retenidos con colectores por vía húmeda, material que era depositado en fosos y mezclado con agua formando lodos para su posterior traslado a vertederos. En los años setenta estos sistemas evolucionan incorporando equipos mecánicos centrífugos o filtros de mangas (también conocido como colector de sacos) que llevan el filler a depósitos de almacenamiento para su posterior utilización en la fabricación de la mezcla. Se utilizan nuevos sistemas de calentamiento a partir de combustibles fósiles, como es el fuel-oil, aceites reciclados o también en los últimos años gas natural.

Durante las décadas de 1970 y 1980, gracias a la aparición de la informática y los ordenadores, se produce un avance importante en la fabricación de las instalaciones, que permite optimizar el diseño de los equipos y el proceso. Se fabrican plantas con sistemas de control computarizados totalmente automáticos, produciendo también una mejora notable en el control del ruido y polvo. El rendimiento es incrementado gracias a la mejora en los sistemas de calentamiento y mezclado de los materiales, capaces de alcanzar elevadas producciones horarias de hasta 400-500 toneladas de mezcla. También aumenta la precisión de todos los trabajos (funcionamiento de motores, dosificación de materiales, etc...) siendo capaces de detectar, comunicar y registrar un mal funcionamiento en cualquiera de sus equipos.

Asimismo, la crisis del petróleo de 1973 hace pensar en la reutilización de las mezclas bituminosas, lo que impulsa la aparición de las primeras plantas de reciclado de tambor secador mezclador con anillo de incorporación de material para reutilizar, que marcan el inicio de la evolución hasta las plantas actuales, más eficientes, limpias y con mayor capacidad de reutilización.

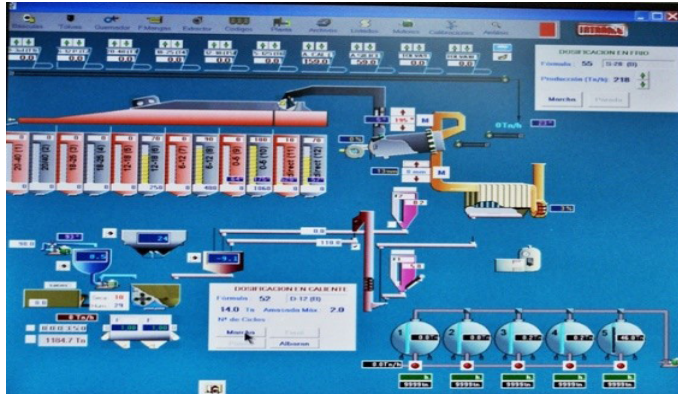


Figura 5. Esquema informativo del panel de fabricación de plantas de finales del siglo XX

3.2. PRIMERAS PLANTAS EN ESPAÑA

Es en la década de los años cuarenta del siglo XX cuando comienzan a instalarse las primeras plantas de fabricación de mezclas bituminosas en caliente en España. Posiblemente la primera planta en España sea una instalación situada en la provincia de Ciudad Real en el año 1945 por Elpidio Sánchez Marcos para la empresa ELSAN⁹, fabricada íntegramente por el propio constructor.



Figura 6. Planta de ELSAN número 5 instalada en Ciudad Real en el año 1945.

⁹ Entre dos siglos. El legado de Elpidio Sánchez Marcos en el centenario de su nacimiento (Salamanca, 1900-2000).

En la zona sur, la empresa Rus instala la primera planta asfáltica colocada en Andalucía en el año 1950 en la carretera que unía las localidades de Utrera y Arahál (Término Municipal de Morón de la frontera).



Figura 7. Planta de la empresa Rus instalada en Morón de la Frontera (1950).

En la zona del Levante el propulsor en este sector para la fabricación de mezclas bituminosas en caliente es la empresa Pavasal, cuya primera planta data del año 1962 instalada en la Comunidad Valenciana, con una producción de 25 toneladas a la hora.



Figura 8. Planta de Pavasal instalada en la Comunidad Valenciana (1962).

En el norte de la Península, en el País Vasco, la empresa Asfaltos Naturales de Campezo coloca una instalación de fabricación de mezclas bituminosas en caliente en la década de los cincuenta.

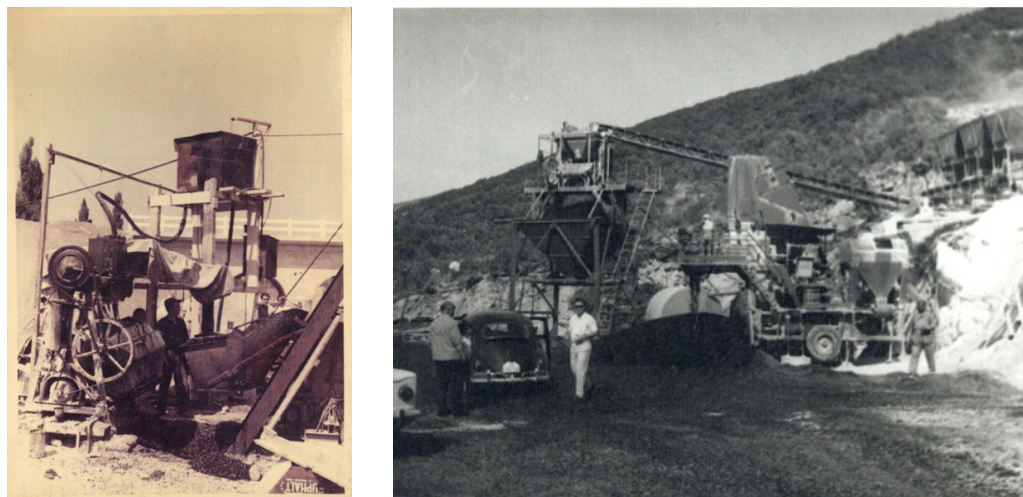


Figura 9. Plantas de fabricación de MBC de Asfaltos Campezo década de los 50.

En España, tras una largo periodo en el que el empleo de plantas continuas fue muy importante, la tendencia ha sido emplear instalaciones discontinuas, la mayoría de ellas fabricadas por empresas ubicadas en Europa, una de las cuales se haya situada en nuestro país. Disponen de tecnología y equipos de alta calidad, desarrollando instalaciones con diseños especiales adaptados a las necesidades cada fabricante de mezclas bituminosas, y que ofrecen mayor facilidad para los repuestos de piezas o la asistencia técnica ante posibles averías.

Actualmente son conocidos fabricantes de plantas asfálticas como Intrame (España), Marini (Italia), Ammann-Sim (Suiza), Wibau y Beninghoven (Alemania), Parker (Reino Unido) o Astec (Estados Unidos). La primera planta instalada por Marini en España data del año 1964 en Vicalvaro (Madrid) para la empresa Portillo, mientras que la empresa Intrame instala su primera planta de fabricación de mezcla bituminosa en caliente en el año 1972 en Valladolid para la empresa Hermanos Zarzuela.

Respecto a la fabricación de las mezclas bituminosas en frio, las instalaciones requeridas son más sencillas debido a no precisar calentamiento previo de los materiales, siendo suficientes una o dos tolvas de alimentación de áridos, un depósito de emulsión y un mezclador.



Figura 10. Fabricación de aglomerado en frío con hormigonera en el año 1951.

En la década de los 60 se desarrolla un equipo móvil denominado MOTO-PAVER, compuesto por los elementos y mecanismos necesarios para fabricar mezclas bituminosas en frío in situ.



Figura 11. Máquina MOTO PAVE en el año 1960.

3.3. NORMATIVA ASOCIADA A LAS PLANTAS

Los requisitos exigibles en la normativa para la fabricación de cada una de las mezclas bituminosas (frio o caliente) en España vienen recogidos en el PG-3¹⁰. En la primera edición del año 1976, para las mezclas en caliente, en su Artículo 542, se indica que las plantas deben disponer de elementos de medida de la temperatura de la mezcla a la salida del secador y materiales (áridos y ligante), con un número no inferior a 4 tolvas de alimentación en frio que lleven dispositivos de dosificación volumétrica, salvo las plantas continuas cuya dosificación será ponderal con control de la humedad de los áridos. Durante el proceso de calentamiento se debe evitar la generación y emisión de gases a la atmosfera y el vertido de lodos de filler de recuperación, debiendo disponer de silos independientes para el filler de recuperación y de aportación. El sistema de dosificación de los materiales en caliente debe ser capaz de dosificar con suficiente exactitud, 0,5 % para los áridos y 0,3 % para el ligante y el filler. En el caso de introducción de aditivos se dispondrá de un sistema capaz de asegurar su correcta dosificación.

En 2001, en la edición del Artículo 543, aparece la obligatoriedad de asegurar las características de los materiales (homogeneidad y propiedades del ligante) almacenados en los silos de mezcla durante al menos 48 horas, facilitando la incorporación de silos de alta capacidad de mezcla. La mayor sensibilidad de la sociedad hacia el cuidado del medio ambiente y la seguridad laboral ha provocado cambios en la normativa. Ya en 2004 la normativa española (Artículo 542 del PG3) cita la obligatoriedad del cumplimiento de la legislación ambiental y de seguridad vigente así como la posibilidad de utilizar material fresado en determinadas condiciones, tanto en instalaciones continuas como discontinuas, siempre y cuando se disponga de los elementos necesarios para una correcta dosificación y distribución en la mezcla. En la última edición del Artículo 542 del PG-3 (año 2014), continuando con la apuesta por la reutilización de los materiales procedentes del fresado de mezclas bituminosas, se indican nuevos requisitos exigibles a las instalaciones para su empleo, como es el porcentaje de material fresado máximo, equipos necesarios, así como los sistemas de dosificación para los distintos tipos de instalaciones. En el año 2008 se introduce la obligatoriedad de cumplimiento del marcado CE y las normas europeas EN 13108 que señalan los distintos controles que deben realizarse en las instalaciones de fabricación sobre los sistemas de dosificación y control de temperatura.

En el caso de las mezclas bituminosas en frio, en su Artículo 541 del PG-3 de 1976 que fue derogado en el año 2004, las instalaciones son más sencillas, con tanques de emulsión calorifugados y con recirculación, sistema de dosificación de ligante con precisión de 0,5 %, con un mezclador de ejes gemelos y la posibilidad de introducir agua junto con los áridos para facilitar la envuelta.

¹⁰ Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes, Artículos 542-543, PG-3 ediciones de 1976, 1989, 1997, 2001, 2004, 2008 y 2014-

4. GENERALIDADES DE LA PUESTA EN OBRA DE MEZCLAS BITUMINOSAS

La calidad de una capa de firme bituminoso depende en primer lugar de la elaboración de una correcta fórmula de trabajo y de una fabricación adecuada. Pero igual de importante para el éxito y durabilidad del firme es la puesta en obra. La puesta en obra es un proceso completo que abarca desde el final de la fabricación de la mezcla bituminosa en caliente en la planta asfáltica, hasta la apertura al tráfico de la superficie pavimentada.

El proceso de puesta en obra de una mezcla bituminosa comprende las fases siguientes:

- Preparación de la superficie a pavimentar
- Transporte a obra de la mezcla
- Extensión de la mezcla
- Compactación de la capa

Pequeñas variaciones en el espesor, en la densidad alcanzada y en la regularidad superficial pueden suponer acortamientos importantes en la vida útil de la capa y del firme construido.

4.1. LA PUESTA EN OBRA DESDE MEDIADOS DEL SIGLO XX

A la vez que evolucionaba la tecnología de fabricación de mezclas bituminosas, también lo hacía la de puesta en obra. A continuación se presenta una panorámica de la evolución en los métodos de puesta en obra del aglomerado asfáltico, desde mediados del siglo pasado hasta la actualidad.

4.1.1. *Operaciones previas: Riego asfáltico y fresado de pavimentos envejecidos*

El riego con emulsión bituminosa tiene como finalidad garantizar la adherencia entre las sucesivas capas del firme. Los primeros riegos se hacían con alquitrán de hulla y posteriormente betún sobre los firmes de macadam con el fin de eliminar el problema del polvo de los caminos que se agravó sobremanera con la extensión del uso del automóvil.

La eliminación de pavimentos bituminosos envejecidos previamente a extender una nueva capa se realizaba en un primer momento con fresadoras en caliente.

El empleo de picas de metal duro de la minería permitió que se realizara el salto tecnológico del fresado en caliente al fresado en frío fabricándose en 1979 la primera fresadora de carga trasera y en 1984 la primera máquina de carga frontal, modificando esta última la logística en la obra¹¹.



Figura 12.. Bituminadoras para la ejecución del riego asfáltico sobre bases granulares¹²



Figura 13. Primeras fresadoras en caliente. 1971 (izda) y 1973 (dcha)



Figura 14. Fresadoras en frío. Carga trasera (izda) y delantera (dcha)

¹¹ www.wirtgen.com

¹² Archivo propio Rus-Eiffage Infraestructuras

4.1.2. Extendido de la mezcla asfáltica

Con el fin de ilustrar la evolución de los procesos de puesta en obra, se reproduce parcialmente un texto de un Manual de 1943 con el que se formaron los ingenieros de caminos españoles de la segunda mitad del siglo XX. Aunque puede resultar un poco extensa la cita, se considera bastante representativa como punto de partida para la panorámica que queremos abordar en la puesta en obra de mezclas bituminosas.

*"la mezcla...se descargará generalmente por gravedad, en camiones que la transportan al punto de empleo; es conveniente que lleven la carga cubierta con toldos; se conserva así la temperatura durante el recorrido. Llegado el camión a obra, debe verter la mezcla sobre unas chapas metálicas, de las cuales se transporta el punto de empleo, a pala o carretilla. En América existen máquinas distribuidoras automáticas de la mezcla... pero no se han empleado en Europa"*¹³

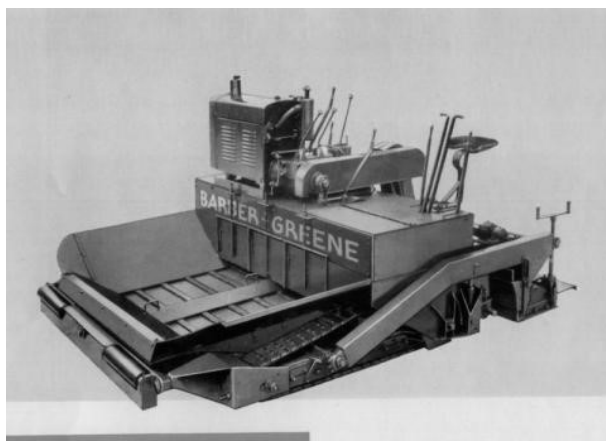


Figura 15. Extendidora Modelo 879 de Barber-Greene (1936)¹⁴

Estas máquinas que se mencionan en el Manual de José Luis Escario son las extendedoras. La primera extendidora automática precursora de las actuales fue el modelo 879 construido por la firma Barber-Greene en 1936. Esta extendidora estaba montada sobre orugas e incorporaba una importante innovación: la regla flotante. La mezcla se recibía en una tolva delantera, pasaba por debajo de la máquina mediante un transportador de listones, se distribuía transversalmente en la calzada mediante un sinfín de reparto y se precompactaba mediante un tãmpor vibrante a 1200 rpm antes de terminar con la regla. El diseño y la velocidad lenta de la máquina compensaban las irregularidades en la superficie de la calzada y producían de

¹³ Escario, J.L. - Caminos (1943)

¹⁴ <https://www.constructionequipment.com>

manera automática una capa de espesor uniforme. A finales de los años 50, el sistema de transmisión mecánico fue sustituido por sistemas de transmisión hidráulico y también se añadieron los sistemas electrónicos de control de nivel, así como el control automático de la regla a comienzo de los años 60. Las reglas de mayor ancho, capaces de pavimentar dos carriles a la vez hicieron su debut en 1968.

4.1.3. Compactación de la mezcla extendida

Siguiendo con el Manual citado, “el apisonado del firme es una operación delicada; de ella depende, en gran parte, su resultado; debe realizarse con un cilindro de 10 a 12 t, en el caso de firmes de agregado grueso, y de 6 a 8 t para morteros asfálticos. La operación de apisonado debe efectuarse según direcciones oblicuas al eje del camino variando, en cada pasada, el ángulo que formen; las apisonadoras que se empleen deben cambiar el sentido de la marcha con suavidad, pues de lo contrario, al realizar esta operación se producen huellas en el firme. La velocidad de marcha debe ser uniforme”.

Los compactadores empleados a finales del siglo XIX eran compactadores de vapor, que luego fueron sustituidos por compactadores de motor diésel en la primera mitad del siglo XX. El primer compactador de vapor fue construido por la firma británica Aveling&Porter en 1865 y el primer compactador diésel por la firma alemana Hamm en 1911.

Hasta mediados de los años 50, la mayoría del aglomerado en caliente se compactaba con una combinación de un compactador ligero tándem liso y un compactador pesado con tres rodillos. A mediados de los años 60 se empieza a popularizar el empleo de los compactadores de neumáticos, así como de los compactadores tándem de rodillo vibratorio cuyo primer modelo fue desarrollado por la empresa alemana BOMAG en 1957.

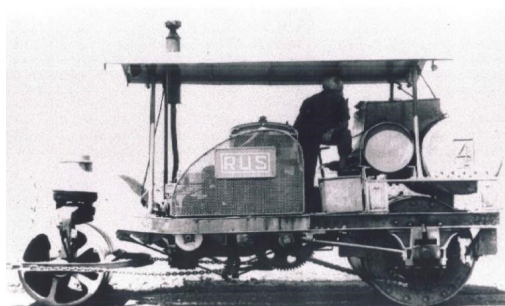
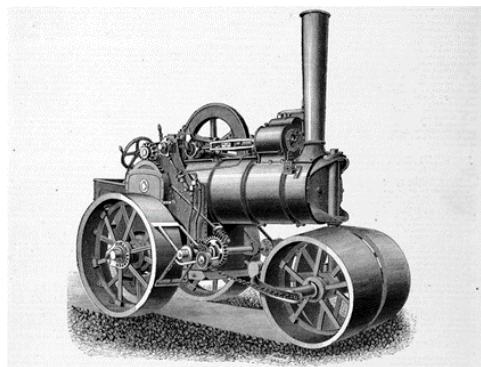


Figura 16. A la izquierda compactador a vapor. Aveling&Porter (1873). A la derecha compactador de motor diésel.

El siguiente avance en la compactación vino dado por la introducción de la tecnología de vibración oscilante, desarrollada por HAMM en 1983. En contraste con la vibración que compacta el material por impactos verticales de la masa del tambor, con el método de oscilación, el tambor en movimiento permanece en contacto permanente con el suelo. Las fuerzas de corte tangenciales aplicadas al material a compactar proporcionan resultados de compactación notablemente mejores al tiempo que minimizan el impacto en las personas, el propio firme, su soporte y el medio circundante.

4.2. LA PUESTA EN OBRA EN LA ACTUALIDAD

En este apartado se resumen los principales equipos empleados en la actualidad para la puesta en obra de mezclas asfálticas, haciendo referencia a la evolución con respecto a la situación del siglo XX esbozada en el apartado anterior ^{15, 16}.

4.2.1. Preparación de la superficie

El riego manual mediante lanza se ha eliminado y se ha generalizado el empleo de cisternas de riego con rampa.



Figura 17. A la izquierda, cisterna de riego. A la derecha, detalle de los abanicos

Por otro lado, en la preparación de la superficie, en operaciones de rehabilitación del pavimento, actualmente es imprescindible el uso de fresadoras y barredoras tanto para la formación de cuñas de arranque y entronque de capas, como para eliminar el pavimento envejecido. La gama de máquinas disponibles es muy amplia en tamaño y prestaciones, y entre las

¹⁵ Costa Hernández, A. - Novedades en la maquinaria de aplicación de mezclas (2009) (<http://www.interempresas.net/ObrasPublicas/Articulos/31455-Novedades-en-la-maquinaria-de-aplicacion-de-mezclas.html>)

¹⁶ García Santiago, J.L.- <https://jluigsa.blogspot.com/>.

innovaciones más importantes de la última década destacan unos sistemas de aspiración más eficaces que reducen las emisiones de polvo durante el trabajo, los sistemas automáticos de nivelación o el empleo de tecnologías 3D que aumentan la precisión del fresado.



Figura 18. Fresadora de 2 metros de anchura de fresado

4.2.2. Extensión de la mezcla

La extensión de la mezcla es una fase clave que tiene como finalidad conseguir una capa de firme homogénea en cuanto a anchura, espesor, pendiente y en las características del material de la capa, así como en regularidad superficial.

En los equipos modernos, los avances producidos con respecto al modelo original de Barber-Greene se reflejan en la automatización de la alimentación, con sensores de llenado de la cámara de sinfines, en el bloqueo del descenso de regla en paradas, en un aumento del grado de precompactación con la introducción de vibración, doble tãmpor o barras de presión en las reglas de alta compactación, en las reglas extensibles hidráulicamente y en los avances en los sistemas de control de nivelación con sensores sin contacto por ultrasonido, referencias láser o 3D incluyendo el guiado automatizado, y en una mayor capacidad de ancho de extendido, triplicando el de aquella primera extendedora.

4.2.2.1. Silos móviles de transferencia

Para conseguir una buena regularidad superficial y garantizar la durabilidad del pavimento es necesario reducir al mínimo las paradas de la extendedora y asegurar una homogeneidad de la mezcla tanto granulométrica como térmica. Las segregaciones térmicas que se producen en las diferentes etapas desde que se fabrica la mezcla hasta que se extiende (costra su-

perior y contorno de la carga del camión, restos en la tolva de la extendedora) reducen la vida útil del firme. Los silos móviles de transferencia actuales cumplen el objetivo de reducir estas segregaciones y eliminar las discontinuidades en la puesta en obra. De forma general se puede definir equipo de transferencia como todo dispositivo móvil que se sitúa entre la extendedora y el camión de transporte de la mezcla bituminosa para independizar el funcionamiento y el movimiento de ambas máquinas y que permite pasar la mezcla desde el vehículo de transporte a la extendedora de manera continua. En el proceso se consigue una cierta homogenización granulométrica y térmica de la mezcla en mayor o menor grado según el equipo de transferencia utilizado. Los silos móviles de transferencia capaces de almacenar de 20 a 25 toneladas de mezcla bituminosa y dotados de un tornillo sinfín antisegregación que vuelve a mezclar el material antes de pasar a la extendedora son los más idóneos para garantizar una homogeneidad térmica y granulométrica.



Figura 19. Extendido a ancho completo con empleo de silo de transferencia

4.2.3. Compactación de la mezcla

La expresión “Compactación inteligente” resume el estado actual de la técnica de compactación. Esta tecnología incluye un sistema de posicionamiento global y controles de retroalimentación de la densificación alcanzada en la capa para ajustes en tiempo real. Los controles de retroalimentación analizan la respuesta de la capa al paso del rodillo y determinan si se requiere otra pasada. Ajustan la fuerza del rodillo al material debajo de él. El análisis incluso determina cuándo un segmento de pavimento no responde al tratamiento con rodillo y recomienda que no se compacten más.

Esta determinación de la densidad de la capa se realiza de manera indirecta a partir de la respuesta de su rigidez al medirse con acelerómetros incorporados a los rodillos.

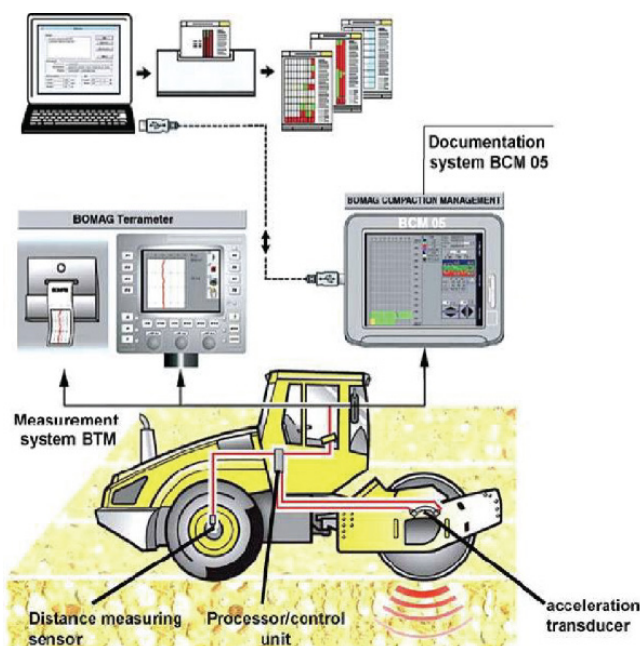


Figura 20. Sistema de Compactación inteligente de BOMAG . (Fuente: www.bomag.com)

5. EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL DISEÑO DE MEZCLAS BITUMINOSAS EN ESPAÑA

El diseño de las mezclas bituminosas ha venido marcado por la normativa española, especialmente el PG3. Los criterios de diseño han ido variando en función de las necesidades existentes, que exigen nuevos requisitos; también se han visto influidos por las novedades que han ido apareciendo en el mercado, intentando utilizar las mejores técnicas disponibles en cada momento. Otra cuestión que ha marcado dicha evolución es la aparición de nuevos métodos de ensayo, que permiten mejorar el conocimiento del comportamiento de las mezclas bituminosas, diseñando el mejor producto para cada aplicación.

¹⁷ www.bomag.com

A continuación, se destacan, cronológicamente, algunos de los cambios en el diseño que se consideran más importantes derivados de las modificaciones normativas. Para un mayor detalle se han incluido el ANEXO 1 y el ANEXO 2, donde pueden comprobarse dichas modificaciones con mayor detalle, tanto por tipo de producto como las modificaciones incluidas por cada modificación de la norma.

1976

Este primer PG-3 tiene algunas características interesantes a destacar.

En relación con los ligantes, se admite el empleo de alquitranes y betunes de penetración sin considerar aún los betunes modificados, que aparecerán más tarde.

Las mezclas normalizadas son las Densas (D), Semidensas (S), Gruesas (G) y Abiertas (A), siendo el método Marshall el empleado para obtención del contenido óptimo de ligante en la mezcla para las mezclas tipo D, S y G.

1989

Esta Orden Circular redujo las opciones de ligantes a emplear, desapareciendo la posibilidad de emplear alquitranes y los betunes más duros (B20/30).

En cuanto a los tipos de mezcla se producen dos cambios sustanciales, como son la incorporación de tamaños máximos menores (8mm) para las mezclas densas (D-8), así como también un cambio que sería fundamental en el futuro: la incorporación de las mezclas drenantes a la normativa. Este hecho permitió su desarrollo y empleo de forma generalizada en toda España.

También fue muy importante la incorporación de nuevos ensayos de diseño y control, como fueron el ensayo en pista de laboratorio para las mezclas densas y semidensas, o el ensayo Cántabro, de pérdida por desgaste, para las mezclas drenantes y abiertas.

1997

En esta modificación normativa se hace por primera vez referencia a los ligantes modificados con polímeros, permitiendo su empleo el comienzo de la utilización de mezclas de pequeño espesor, que también se verán normalizadas en esta modificación. Así, se introducen en la normativa las mezclas discontinuas para capas finas, divididas en dos familias: mezclas F (finas) y mezclas M (monogranulares).

En relación con los ensayos de diseño y control, destaca la incorporación del ensayo cántabro húmedo para las mezclas más abiertas (porosas y tipo M).

2001

Es a partir de esta revisión normativa cuando se empieza a incluir una nota que indica la posibilidad de emplear el polvo de neumáticos fuera de uso donde sea técnica y económicamente viable.

En esta modificación desaparecen las mezclas tipo D-8, las Abiertas y la P-12, incorporando la posibilidad de emplear las mezclas de Alto Módulo en capa intermedia o de base bituminosa en espesor entre 6 y 12 cm.

En cuanto a los criterios de diseño y control, se producen una serie de cambios normativos, especialmente orientados a las condiciones de ensayo y al endurecimiento de ciertos requisitos, los cuales pueden ser analizados con detalle en los ANEXOS 1 y 2.

2004

En esta modificación normativa no se producen grandes cambios. Quizás uno de los puntos a destacar es la incorporación de las nuevas nomenclaturas de los tipos de ligante. En relación con las mezclas, se incrementa el espesor de capa de MAM de entre 6 y 12 cm a entre 7 y 13 cm, debiendo además poseer este tipo de mezclas un módulo superior a 11000 MPa y cumplir los requisitos de mezclas semidensas.

2008

Es esta, quizás, una de las modificaciones normativas más importantes producidas en los últimos tiempos, ya que en ella se produce la adaptación de la normativa española a la normativa europea, que entra en vigor ese año, con la aplicación obligatoria de las normas armonizadas y el marcado CE.

Así, se produjeron modificaciones en las denominaciones de las mezclas, apareciendo en la normativa denominaciones como mezclas tipo Hormigón bituminoso (AC) o mezclas tipo BBTM. También se incorporan nuevos métodos de ensayo y se modifican algunas condiciones de ejecución de los ya existentes. Pero, seguramente, el punto más controvertido fue la desaparición como parámetros de control de la estabilidad y deformación Marshall, que habían sido empleados desde los primeros tiempos y era el ensayo con el que se tenía más experiencia.

2014

En esta fecha se producen cambios fundamentalmente para adecuar la norma a las nuevas tecnologías que van surgiendo en la fabricación de las mezclas bituminosas, muchas de ellas a conseguir productos más sostenibles.

De esta forma, se incorpora al pliego la definición de mezclas semicalientes, permitiendo su uso, siempre y cuando se obtengan los resultados exigidos a las mezclas fabricadas en caliente. También se permite un mayor porcentaje de incorporación de material fresado a las mezclas.

En relación con los requisitos exigidos, se producen algunas modificaciones generadas por la mayor experiencia con los nuevos métodos de ensayo y los modificados que se incorporaron a la norma en el año 2008. Por ejemplo, se producen cambios en los requisitos para el ensayo de rodadura para determinadas categorías de tráfico.

2019

Se introduce el artículo 544: “Mezclas bituminosas tipo SMA”, en el que se establecen las condiciones de diseño para mezclas tipo Stone Mastic Asphalt (SMA) una tipología de mezcla discontinua similar a las ya recogidas BBTM, pero con un menor contenido de huecos que se han usado comúnmente en otros países por su elevada durabilidad y buen comportamiento frente a la reflexión de fisuras. Dada su similitud con las BBTM tienen muchos puntos comunes en su diseño.

Tal y como se ha comentado anteriormente, este apartado está mucho más detallado en los ANEXOS 1 y 2 de este documento.

6. CONTROL DE CALIDAD

El control de calidad de las mezclas bituminosas es esencial para asegurar que los materiales son adecuados y que se cumplen con los procedimientos de fabricación y aplicación idóneos para conseguir el mejor desempeño posible de las mismas.

En el proceso de control de calidad de las mezclas bituminosas hay que considerar, además del control de los materiales constituyentes y los productos finales fabricados, el control del proceso de fabricación y puesta en obra, fundamentales para que el producto final cumpla los requisitos que se le solicitan.

Tampoco hay que olvidar que, para poder evaluar las características de los diferentes materiales y productos es necesario contar con una serie de normas de ensayo normalizadas.

6.1. EVOLUCIÓN DEL CONTROL DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE

Haciendo una mirada retrospectiva a la evolución del control de calidad en España, uno de los primeros documentos de interés fue publicado en el año 1965, denominado Instrucciones para el control de fabricación y puesta en obra de mezclas bituminosas de la División de Materiales de la Dirección General de Carreteras.

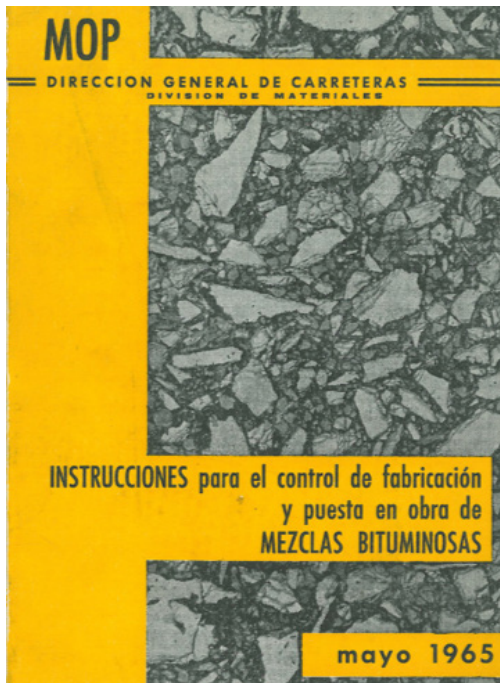


Figura 21. Portada del documento
"Instrucciones para el control de fabricación
y puesta en obra de mezclas bituminosas"

El documento tiene una visión global del control de calidad, incluyendo los elementos de control de la instalación de la central de fabricación de mezclas bituminosas, la organización y la misión del equipo de control, dando una visión más bien de aseguramiento de la calidad, en la línea de las normas actuales de los sistemas de gestión de calidad.

En relación con el control de los materiales, el documento especifica la metodología a seguir en cuanto a los ligantes/betunes (penetración, contenidos de los depósitos...), el control de áridos tanto en frío en acopios y silos como la combinación de áridos en caliente.

Finalmente, hace referencia al control de la mezcla fabricada en cuanto a temperaturas, composición, características Marshall, rendimientos y comprobación de la instalación. Además, se incluyen datos de puesta en obra relacionados con espesores de capa, superficie, volumen extendido, datos climatológicos e incidencias reseñables.

Posteriormente, en el año 1976 se publicó el Manual de control de fabricación y puesta en obra de mezclas bituminosas, editado por MOPU (Dirección General de Carreteras), donde aparecen como puntos relacionados la supervisión de la puesta a punto de la instalación y obtención de la fórmula de trabajo, control de acopios, criterios para la toma de muestra, ensayos a realizar y tratamiento de resultados, control del suministro de los materiales y de la fabricación de la mezcla, control del transporte, extensión y compactación. Finaliza realizando una exposición sobre cómo hacer los partes de recopilación de los datos obtenidos durante el control.

Ese mismo año se aprueba el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Carreteras y caminos vecinales (el conocido PG-3), que aprueba el artículo 542 “Mezclas bituminosas en caliente”, donde se incluyen cuestiones sobre el control de calidad de las mezclas.

Desde la entrada en vigor de los artículos 542 y, posteriormente los artículos 543 y 544 del PG-3, el control de calidad de las mezclas bituminosas en caliente se basa en el control de procedencia de los materiales constituyentes y de los propios materiales durante la fabricación y ejecución, sin olvidar que para obtener una mezcla bituminosa adecuada hay que tener en cuenta la puesta a punto de la maquinaria y/o instalación de fabricación en cuanto a calibraciones y correcta operatividad, con operaciones de mantenimiento preventivo.

Tal y como ya se vio en un apartado anterior, estos artículos han ido evolucionando, adaptándose a las nuevas necesidades.

Desde la aprobación del PG-3 en el año 1976, el control de los ligantes hidrocarbonados se realizaba en base a las especificaciones del artículo 211 “Betunes asfálticos”. Posteriormente se aprobó el artículo 215 “Betunes modificados” que progresó al actual artículo 212, con sus respectivas modificaciones a lo largo de los años. Estas exigencias se han ido adaptando, siendo una de las modificaciones más importantes la surgida de la obligatoriedad del cumplimiento del marcado CE.

También ha evolucionado el control de calidad de los áridos, de forma similar a los ligantes, teniendo en cuenta los cambios de requisitos, de normas de ensayo aplicables y de la documentación necesaria para su empleo, pasando de solicitar, además de los ensayos correspondientes, un certificado acreditado de cumplimiento, homologación de marca, sello o distintivo de calidad, para finalmente exigir el Marcado CE con sistema de conformidad 2+, salvo para los áridos fabricados en el propio lugar de construcción para su incorporación en la obra, sobre los cuales se deben evaluar las mismas propiedades especificadas.

Aunque todavía no lo recoge la normativa española, ya existen sistemas de control de calidad aplicados a toda la capa extendida, con registro y referenciación GPS de los resultados del mismo, en modo similar al control de regularidad superficial o de macrotextura con equipos de alto rendimiento. Así, se dispone de un control de la temperatura en tiempo real de extendido mediante escáneres de infrarrojos, y también de un control de densidades de toda la capa, ya sea en tiempo real mediante sistemas de compactación inteligente, o con la capa terminada con auscultación mediante georradar.

6.2. EVOLUCIÓN DEL CONTROL DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS EN FRÍO

Las mezclas bituminosas en frío presentan la peculiaridad que como ligante bituminoso emplean actualmente emulsiones bituminosas, anteriormente incluso betunes fluxados, con lo que los ensayos de control de calidad de procedencia de los componentes varían respecto a los betunes. Sobre el control de ejecución de las mezclas hay que tener en cuenta que pueden contener agua y/o fluxantes por lo que es necesario realizar los ensayos adecuados para la mejor evaluación.

En el año 1976 se aprueban los artículos 540 “Tratamientos superficiales con lechada bituminosa” y 541 “Mezclas bituminosas en frío” del PG-3, con el mismo concepto general que el de las mezclas bituminosas en caliente, adaptando características, tipos de ensayo y, especialmente, el control de la maquinaria empleada en el proceso de ejecución, cuando el proceso se ejecuta in situ.

El control de calidad se ha basado en el control de procedencia de los materiales constituyentes, control de ejecución y fabricación y control de la unidad terminada. Hay que destacar las singularidades de aquellas técnicas que realizan la aplicación in situ, donde el control de la dosificación conlleva elementos particulares, por lo que también es necesaria la calibración, puesta a punto y mantenimiento de la maquinaria involucrada, orientando los esfuerzos hacia un mejor control de la dosificación y ejecución de las diferentes aplicaciones.

Una de las técnicas en las que con el tiempo su control de calidad ha evolucionado más ha sido la de microaglomerados en frío.

El control de los microaglomerados en frío se ha basado en el artículo 540 del PG-3, hasta la aparición del marcado CE de lechadas bituminosas; se aplica la norma UNE EN 12273, donde se especifican los requisitos prestacionales y los procedimientos de control para la aplicación.

Además de los controles habituales de los materiales constituyentes, se incluyen en el proceso calibraciones/verificaciones y mantenimiento de la maquinaria, control del proceso de la aplicación (zonas acopio, limpieza tanques, control cantidades de los componentes, control ligante residual, condiciones meteorológicas y estado de las características de la superficie a

aplicar). También se realizan controles después de la aplicación, como son la evaluación de defectos, medición de la macrotextura y/o resistencia al deslizamiento a los 7 días.

El Mercado CE para los microaglomerados en frío ha supuesto un control del proceso igual para todos los fabricantes, en cuanto a ensayos, frecuencias, unificación de criterios,... Y para las administraciones una adaptación de las especificaciones técnicas en base a la normativa europea en ensayos y categorías.

Pasando ya a las mezclas bituminosa en frío, éstas se rigieron por el artículo 541 del PG-3, hasta que fue derogado en el año 2004. Éste artículo no ha sido reemplazado, aunque ya existe un proyecto de norma europeo que va a regir este tipo de mezclas; esta norma (UNE-EN 13108-31 Mezclas bituminosas. Especificaciones de materiales. Parte 31: Hormigón asfáltico con emulsión bituminosa) no será una norma armonizada por el momento, por lo que no se podrá aplicar a las mezclas en frío el marcado CE.

Los principales avances en el control de calidad en las mezclas abiertas en frío están relacionados con el control de los grados de envuelta de los áridos con las emulsiones (lo que ha llevado a desarrollar formulaciones más robustas capaces de adaptarse a una gran variedad de naturalezas de áridos), formas de rotura de la emulsión, limpieza del árido, trabajabilidad y evolución del curado.

Para las mezclas densas en frío, se realizan las mismas inspecciones que para las mezclas bituminosas en caliente, añadiendo un mayor control en la calidad de las fracciones finas, grados de envuelta de los áridos combinados con la emulsión, rotura, humedad necesaria para la correcta envuelta para conseguir una evolución positiva de la maduración y curado final, y así obtener las mejores propiedades de desempeño de la mezcla.

El estudio de los materiales y propiedades de las mezclas en función de su diseño de laboratorio son fundamentales para un correcto desempeño de las mismas, aspecto este último que ha evolucionado según nuevos sistemas de preparación de probetas y nuevos ensayos de caracterización.

6.3. NORMAS DE ENSAYO

No se puede olvidar que los controles de calidad tanto sobre las materias primas como sobre las mezclas fabricadas y colocadas están basados en una serie de métodos de ensayo normalizados, que también han sufrido grandes modificaciones a lo largo del tiempo, impulsados por el interés de medir otras características de las mezclas o las mismas características con otros procedimientos y equipos más adecuados.

En España, las primeras normas empleadas fueron las normas NLT, que son las normas elaboradas por el CEDEX, por su Laboratorio de Transportes; su inicio comienza en el año 1958

(previo encargo realizado por la Dirección General de Carreteras y Caminos Vecinales el 21-02-58).

Estas normas se han ido aprobando en diferentes bloques, siendo las primeras normas las que se aprueban por O.M. de 31 de diciembre de 1958. Posteriormente, en el año 1963, se publica la segunda edición de las normas, siendo en el año 1973 la aprobación de la tercera edición (cuyas normas fueron aprobadas por el Director General de Carreteras); le sigue la edición de 1986 y así sucesivamente hasta nuestros días.

En la actualidad, las normas NLT están dejando paso a las UNE, siendo las normas UNE-EN 12697 la familia de normas que se aplica para el marcado CE de las mezclas bituminosas. A pesar de esta paulatina sustitución todavía quedan normas NTL en vigor, que se aplican para el control de la calidad de las mezclas bituminosas, especialmente orientadas a los productos ya colocados en obra.

7. BIBLIOGRAFIA

1. De Coulaïne, M. - Sur l'emploi des substances bitumineuses dans la construction des chaussées, sur la nature, la composition, les propriétés de ces substances et leurs diverses applications- Annales de Ponts et Chaussées (1850)
2. Malo, L. - Note sur l'asphalte, son origine, sa préparation, ses applications (Annales des Ponts et Chaussées -1861 T1)
3. García Santiago, J.L - ¿Cómo hemos llegado a los actuales firmes asfálticos? Unos pequeños apuntes históricos – Parte2. Los firmes se tiñen de oscuro hullero. (Blog Motores y Carreteras <https://jluisgsa.blogspot.com>) (2018)
4. Del Rio, M. - Afirmados de asfalto natural- Revista de Obras Públicas nº1928, 76, tomo I (2511): 360-361) (1928)
5. Aguilar, M. - Ensayos de firmes especiales para carreteras- Revista Obras Públicas nº2439 (1925)
6. Inaraja Arizti, R. - Las emulsiones catiónicas fabricadas a pie de obra. - Revista de Obras Públicas Nº 2669 (1962)
7. The asphalt Institute. 1982.Manual del Asfalto.

8. Asphalt academy. November 2007. The use of modified bituminous binders in road construction.
9. Entre dos siglos. El legado de Elpidio Sánchez Marcos en el centenario de su nacimiento (salamanca, 1900-2000).
10. Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes, Artículos 542-543, PG-3 ediciones de 1976, 1989, 1997, 2001, 2004, 2008 y 2014-
11. Archivo propio Rus-Eiffage Infraestructuras
12. www.wirtgen.com
13. Escario, J.L. - Caminos (1943)
14. <https://www.constructionequipment.com>
15. Costa Hernández, A. - Novedades en la maquinaria de aplicación de mezclas (2009) (<http://www.interempresas.net/ObrasPublicas/Articulos/31455-Novedades-en-la-maquinaria-de-aplicacion-de-mezclas.html>)
16. García Santiago, J.L.- <https://jluisgsa.blogspot.com/>.
17. www.bomag.com

ANEXO 1

EVOLUCIÓN DISEÑO DE MEZCLAS. CUADROS RESUMEN POR TIPO DE MEZCLA

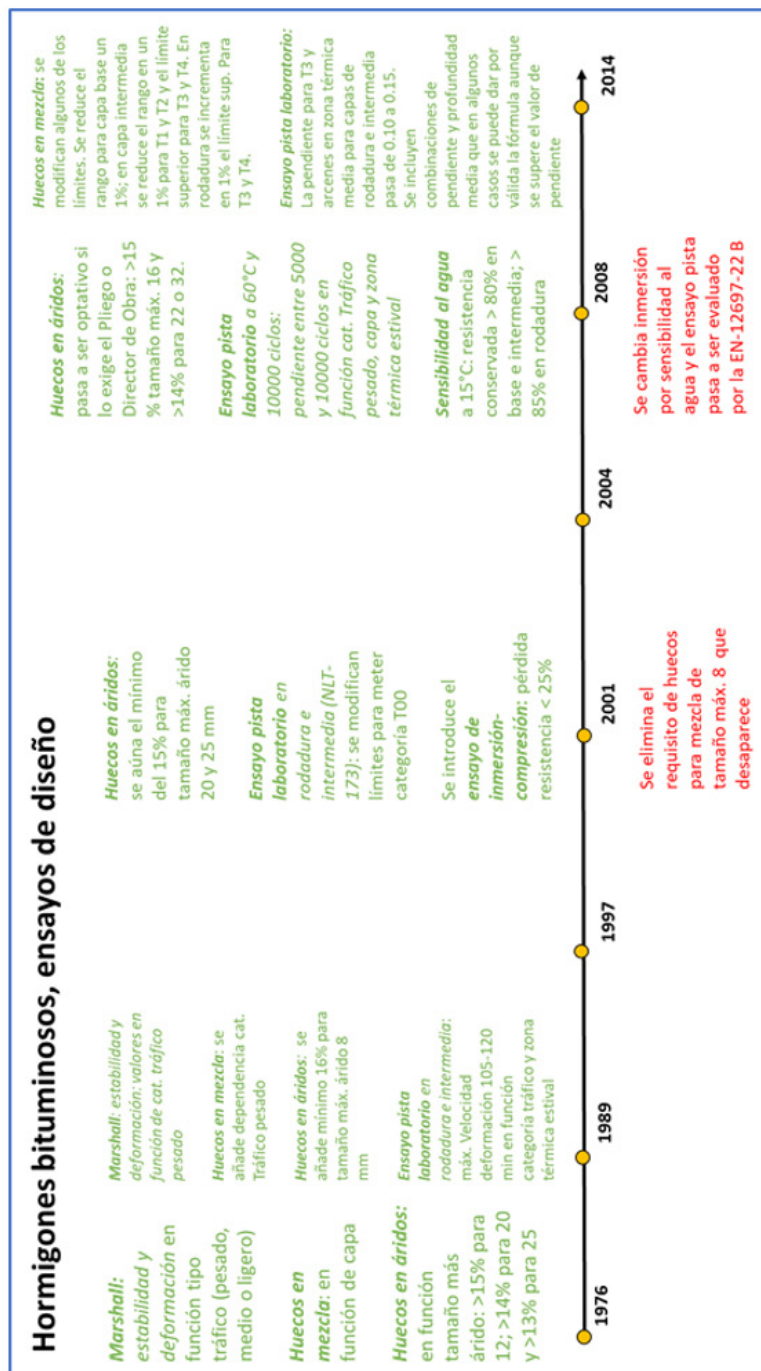


Figura 22. Evolución histórica de los ensayos de diseño para hormigones bituminosos

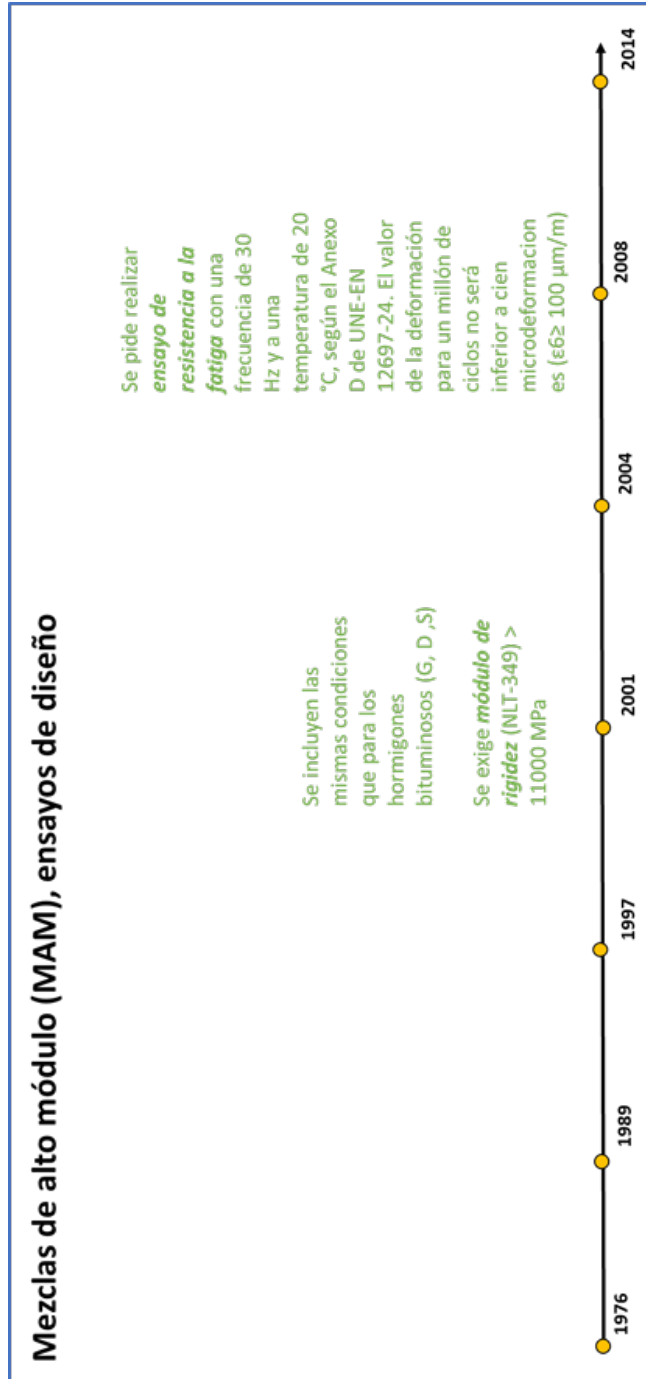


Figura 23. Evolución histórica de los ensayos de diseño para mezclas de alto módulo

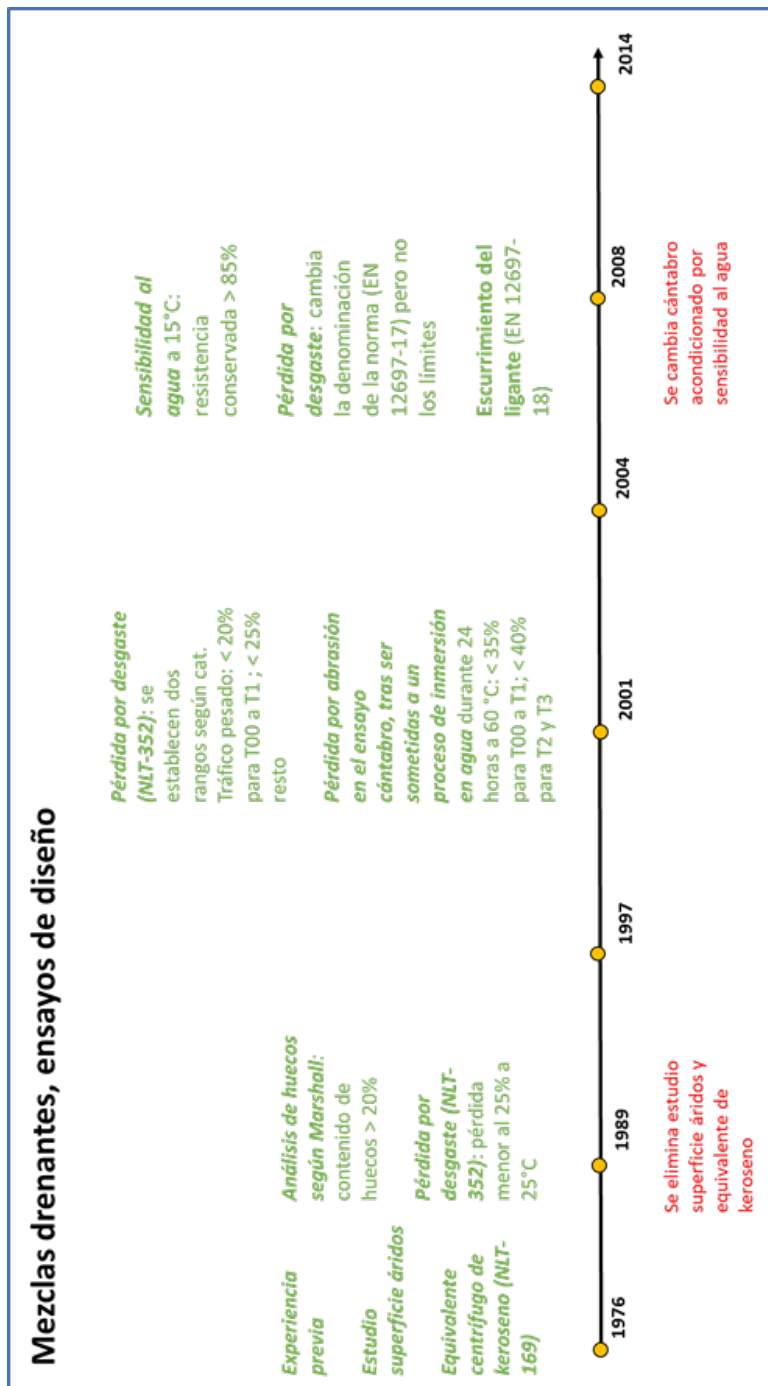


Figura 24. Evolución histórica de los ensayos de diseño para mezclas drenantes



Figura 26. Evolución histórica de la tipología de mezcla y espesor por capas

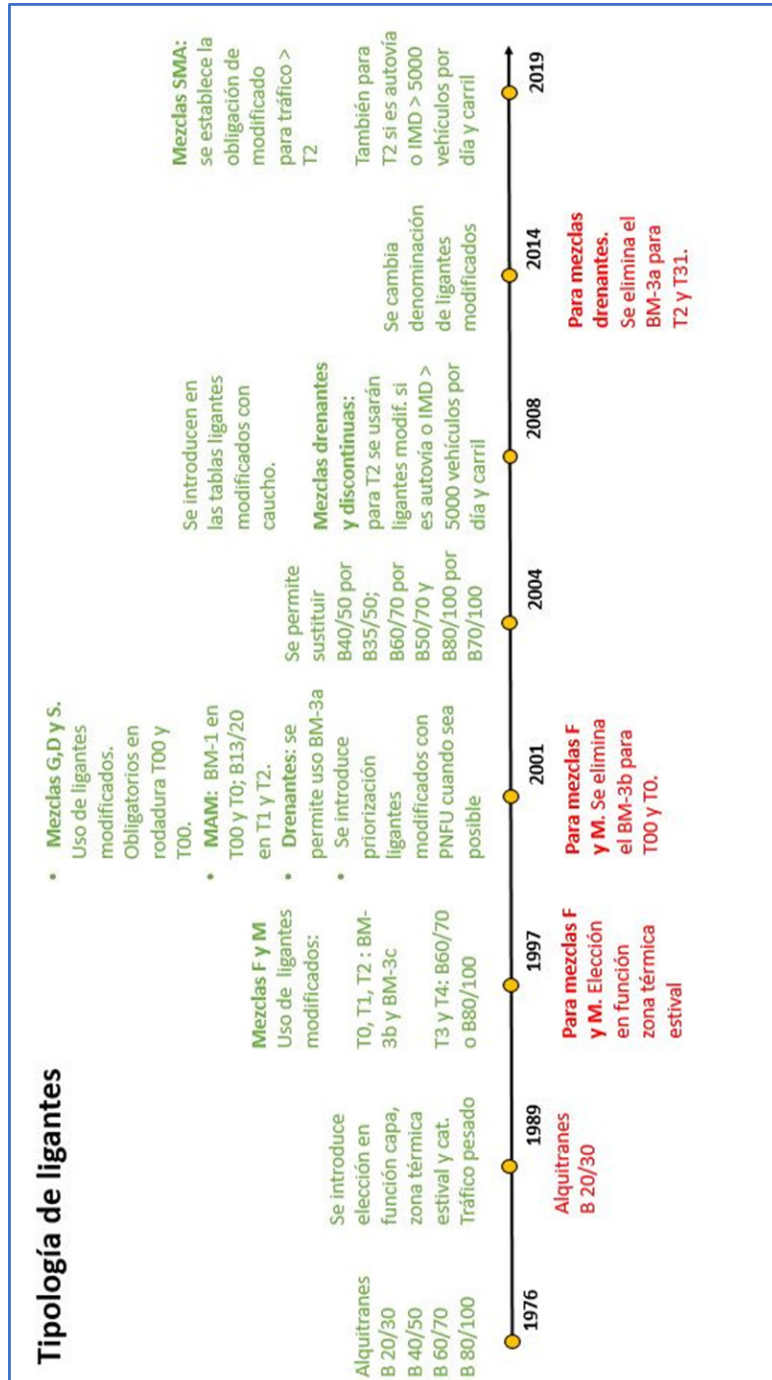


Figura 27. Evolución histórica de la tipología de ligantes

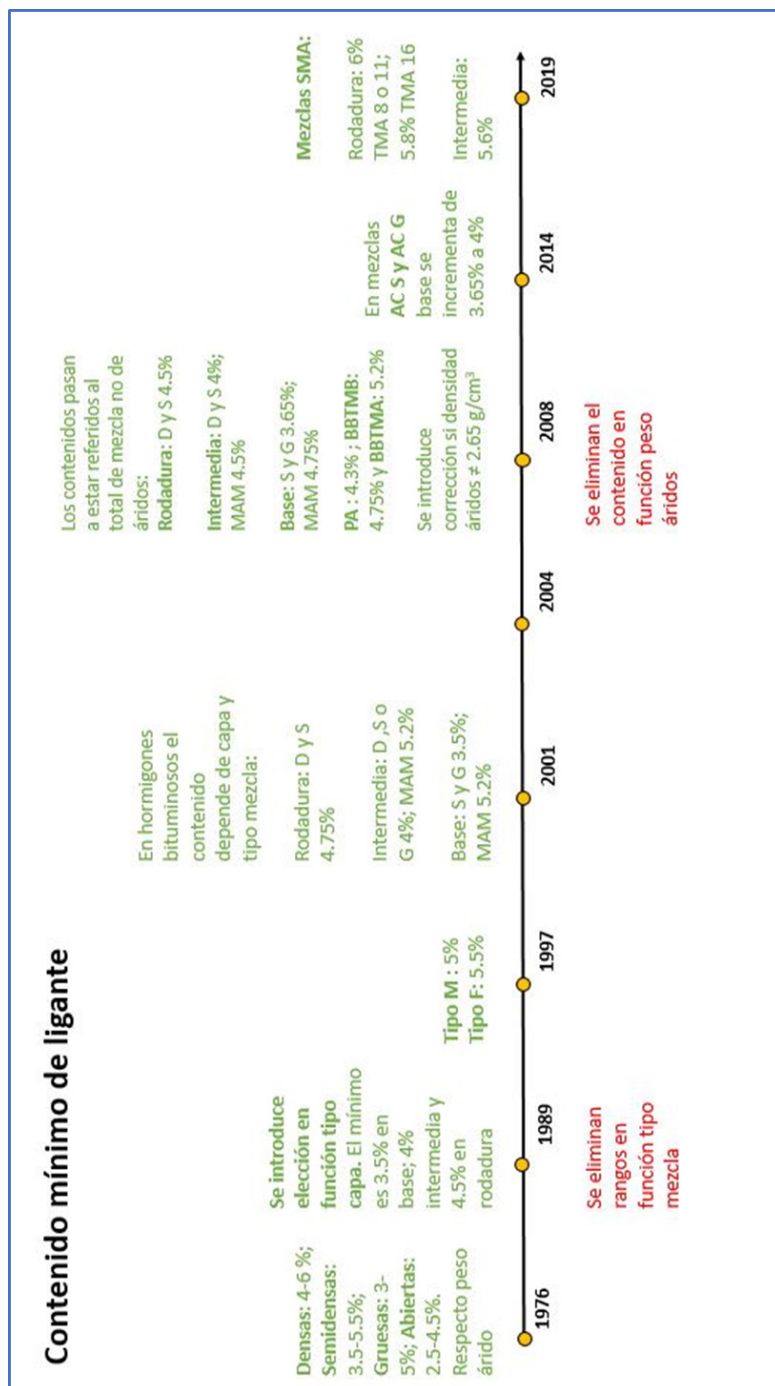


Figura 28. Evolución histórica del contenido mínimo de ligante en las mezclas bituminosas



Figura 29. Evolución histórica de la relación recomendada filler/betún



ANEXO 2

EVOLUCIÓN DISEÑO DE MEZCLAS MODIFICACIONES NORMATIVAS

1976

- **Elección del tipo de ligante:**

Permite la elección entre alquitranes y los betunes de penetración: B 20/30, B 40/50, B 60/70 y B 80/100 sin que haya aún referencia a ligantes modificados estandarizados ni al uso en distintas capas.

- **Elección del tipo de mezcla y espesores:**

Se contemplan cuatro tipos de mezclas: densas (D), semidensas (S), gruesas (G) y abiertas (A) en tres variantes de tamaño máximo de árido que se fijan en función del espesor de capa compactada: 12 si el espesor es menor o igual a 4 cm; 20 si está entre 4 y 6 cm y 25 si la capa es mayor de 6 cm

- **Contenido mínimo de ligante a emplear:**

Se establecen unos rangos de porcentaje de ligante respecto de peso de árido entre 4-6% para mezclas densas, 3.5-5.5% para semidensas, entre 3-5% para gruesas y, entre 2.5-4.5% para mezclas abiertas

- **Relación ponderal filler/betún:**

Queda supeditada a lo que establezca el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares.

- **Elección del contenido de ligante (fórmula de trabajo):**

- Mezclas abiertas tipo A: se fija a la vista de los materiales a emplear, basándose principalmente en la experiencia obtenida en casos análogos, en la superficie específica del árido, o por medio del ensayo del equivalente centrífugo de keroseno, según la Norma NLT-169/72.
- Mezclas densas, semidensas y gruesas: método Marshall (estabilidad y deformación) según criterio de huecos en mezcla y áridos en función de la categoría de tráfico (pesado, medio, ligero) y tipo de capa (rodadura, base e intermedia).

1989

- **Elección del tipo de ligante:**

Será B40/50, B60/70 o B80/100 (se elimina el B20/30 y los alquitranes). Su elección dependerá de la capa a que se destine, de la zona térmica estival en que se encuentre y de la categoría de tráfico pesado (novedad respecto al anterior).

- **Elección del tipo de mezcla y espesores:**

Se introduce un tamaño menor de mezcla densa, el de 8 cm y las mezclas drenantes tipo P y PA. El tipo de mezcla a emplear depende del tipo de capa en que se va a extender (novedad) y de su espesor.

- **Contenido mínimo de ligante a emplear:**

Se establecen un contenido mínimo de ligante en función del tipo de capa en lugar de los rangos que se establecían anteriormente en función del tipo de mezcla. Así el contenido de ligante no será inferior al 3,5% de la masa total de áridos (incluido el polvo mineral) en capas de base, ni al 4% en capas intermedias, ni al 4,5% en capas de rodadura.

- **Relación ponderal filler/betún:**

Se introducen unos límites para las mezclas densas, semidensas y gruesa empleadas en las categorías de tráfico pesado T0, T1 y T2 en función del tipo de capa y de la zona térmica estival.

- **Elección del contenido de ligante (fórmula de trabajo):**

- Temperatura de mezclado para una viscosidad de ligante de 150-190 cSt. En mezclas abiertas y drenantes deberá comprobarse que no se produce escurrimiento del ligante a esa temperatura.
- Mezclas abiertas y drenantes: el análisis de huecos empleando el método Marshall, según la Norma NLT-159/86, y la pérdida por desgaste según la Norma NLT-352/86. Los huecos de mezcla no deben ser inferiores al 20% y la pérdida por desgaste a $25\pm 1^{\circ}\text{C}$ no debe sobrepasar el 25% en masa.
- Mezclas densas, semidensas y gruesas: análisis de huecos y la resistencia a la deformación plástica empleando el método Marshall, según la Norma NLT-159/86, y (para capas de rodadura o intermedias) mediante la pista de ensayo de laboratorio, según la Norma NLT-173/84. En este último, el parámetro analizado es la máxima velocidad de deformación en el intervalo de 105 a 120 minutos en función de la categoría de tráfico pesado y la zona térmica estival.

1997

- **Elección del tipo de ligante:**

Se hace referencia por primera vez a ligantes modificados con polímeros estableciendo la elección exclusivamente en función de la categoría de tráfico y no de la zona térmica estival para mezclas discontinuas. Para categorías de tráfico pesado T0, T1 y T2 se emplearía betún asfáltico modificado con polímeros tipo BM-3b y BM-3c. Para categorías T3 y T4 se podría emplear betún asfáltico tipo B 60/70 u 80/100.

- **Elección del tipo de mezcla y espesores:**

Se introducen las mezclas discontinuas para capa de rodadura de pequeño espesor. Se distinguen dos husos con tamaño máximo de 8 y 10 mm. Se distinguen mezclas discontinuas para capas finas (tipo F) para emplear en espesores comprendidos entre 2 - 3.5 cm; y mezclas discontinuas monogranulares, tipo M, para capas de espesores comprendidos entre 1 y 2 cm. La fracción del árido que pasa por el tamiz UNE 5 mm y es retenida por el tamiz 2,5 mm, será inferior al ocho por ciento (8%) del peso total del árido de la mezcla en seco.

- **Contenido mínimo de ligante sobre árido a emplear:**

No será inferior al 5% en mezclas tipo M ni al 5.5% en la tipo F (superior al fijado anteriormente en capas de rodadura).

- **Relación ponderal filler/betún:**

No se especifica.

- **Elección del contenido de ligante (fórmula de trabajo):**

Temperatura de fabricación de la mezcla para viscosidad del ligante entre 150 y 190 cSt. Deberá comprobarse que no se produce escurrimiento del ligante a esa temperatura.

- Mezclas tipo F:

- o Análisis de huecos y la estabilidad Marshall (NLT-159), aplicando 50 golpes por cara para la compactación de las probetas. Se establece un mínimo de estabilidad de 7.5 kN, pero no de deformación Marshall. El contenido mínimo de huecos en mezcla es del 4%, no se establece un mínimo de huecos en áridos.
 - o Velocidad de deformación en el intervalo de 105 a 120 minutos, en el ensayo de resistencia a las deformaciones plásticas mediante la pista de ensayo en laboratorio (NLT-173) en función de la zona térmica y categoría de tráfico.
 - o Resistencia en el ensayo de inmersión-compresión (NLT-162), no rebasará el 25%.

- Mezclas tipo M:
 - o Análisis de huecos y la pérdida por abrasión en el ensayo cántabro, según la Norma NLT-352, similar a las mezclas abiertas y drenantes anteriores, pero con un contenido de huecos de 12% mínimo y una menor pérdida de partículas menor al 15%.
 - o Pérdida por abrasión tras ensayo cántabro, según la Norma NLT-352, tras ser sometidas a un proceso de inmersión en agua durante 4 días a 49°C, no rebasará el 25 %.

2001

Mezclas bituminosas en caliente

- **Elección del tipo de ligante:**

Como en el 89, en función de la categoría de tráfico y de la zona térmica estival, pero en este caso se introducen los ligantes modificados con polímeros siendo estos obligatorios en capas de rodadura y tratamientos superficiales en categorías de tráfico T00 y T0.

Para mezclas bituminosas en caliente de alto módulo el tipo de ligante hidrocarbonado a emplear será el BM-1 para las categorías de tráfico pesado T00 y T0 y el B13/22 para las categorías de tráfico pesado T1 y T2. Para mezclas bituminosas drenantes, se podrá emplear el tipo BM-3a, para las categorías de tráfico pesado T00 a T1.

A partir de esta revisión, en todas se incluirá una nota que indica que en las obras en las que la utilización del producto resultante de la trituración de los neumáticos usados sea técnica y económicamente viable se dará prioridad a estos materiales.

- **Elección del tipo de mezcla y espesores:**

Se introducen las mezclas de alto módulo para su empleo en capa intermedia o de base bituminosa en espesor entre 6 y 12 cm. Estas deben cumplir los mismos requisitos que las D, S y G y tener un módulo dinámico a 20 ° (NLT-349) >11.000 MPa.

Se suprime el uso de la mezcla tipo D8, A12 y P12, se incluyen las mezclas de alto módulo (MAM) y se incrementa el espesor mínimo en capa de rodadura de 3 a 4 cm para las mezclas D12, S12 y PA-12.

- **Contenido mínimo de ligante a emplear:**

Se establece un contenido mínimo de ligante que ya no depende únicamente del tipo de capa (como en la versión de 1989) sino también del tipo de mezcla.

- **Relación ponderal filler/betún:**

Se mantiene respecto de la versión de 1989 cambiando únicamente la relación para capa base que se incrementa. Para mezclas de alto módulo esta relación estará comprendida entre 1.3 y 1.5.

- **Elección del contenido de ligante (fórmula de trabajo):**

- Mezclas densas, semidensas, gruesas y de alto módulo:
 - o Se mantiene el análisis de huecos, estabilidad y la resistencia a la deformación plástica empleando el método Marshall y para capas de rodadura o intermedia mediante la pista de ensayo de laboratorio, según la NLT-173. Hay algunos cambios en los límites establecidos para introducir la categoría de tráfico T00 y las mezclas de alto módulo. Se aúna el requisito de huecos en áridos de las mezclas tipo 20 y 25.
 - o La pérdida de resistencia en el ensayo de inmersión-compresión, según la NLT-162, no rebasará el 25% (como en mezclas tipo M)

- **En mezclas drenantes:**

- o Se mantiene el mínimo de huecos de la mezcla en 20% pero en relación a la pérdida de desgaste a 25 °C, según la NLT-352, se establecen dos rangos en función de la categoría de tráfico. No deberá rebasar el 20% en masa, para las categorías T00 a T1 y el 25% en los demás casos
- o La pérdida por abrasión en el ensayo cántabro, según la NLT-352, tras ser sometidas a un proceso de inmersión en agua durante 1 día a 60 °C (en lugar de los 4 días a 49°C que se fijaban para mezclas tipo M) no rebasará el 35% para las categorías de tráfico pesado T00 a T1, y el 40% para las categorías de tráfico pesado T2 y T3 (se establece diferenciación por categoría de tráfico).

Para capas de rodadura, la fórmula de trabajo de la mezcla bituminosa en caliente deberá asegurar el cumplimiento de las características de la unidad terminada en lo referente a la macrotextura superficial según la NLT-335, y la resistencia al deslizamiento, según la NLT-336. Se establecen unos mínimos distintos en función de si la mezcla es drenante (más exigente) o no.

Mezclas discontinuas para capa de rodadura

- **Elección del tipo de ligante:**

Se mantienen los ligantes definidos para las distintas categorías de tráfico estableciendo el BM3-c de manera exclusiva para las categorías T00 y T0.

- **Elección del tipo de mezcla y espesores:**

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

- **Contenido mínimo de ligante a emplear:**

Los contenidos mínimos de ligante de ambas mezclas se mantienen.

- **Relación ponderal filler/betún:**

Se establecen las relaciones que no se incluían en la versión de 1997 siendo entre 1.4-1.8 para mezclas tipo F y entre 1.2-1.4 para las de tipo M.

- **Elección del contenido de ligante (fórmula de trabajo):**

Las temperaturas de calentamiento del ligante se fijan dentro del rango correspondiente a una viscosidad del betún de 150-300 cSt (antes era hasta 190cSt) en el caso de mezclas bituminosas discontinuas con betunes asfálticos y dentro del rango recomendado por el fabricante, en el caso de mezclas con betunes modificados con polímeros.

Los criterios para establecer la fórmula de trabajo de las mezclas F y M, así como los límites de ensayos no varían en esta versión respecto de la del 97. La única variación es la duración del acondicionamiento del ensayo de abrasión cántabro para ver adhesividad árido-ligante en mezclas tipo M que pasa a ser de un día a 60°C. Además, de nuevo se incluye la necesidad de comprobar en ambas mezclas que no hay escurrimiento de ligante.

Para capas de rodadura, la fórmula de trabajo de la mezcla bituminosa en caliente deberá asegurar el cumplimiento de las características de la unidad terminada en lo referente a la macrotextura superficial según la NLT-335, y la resistencia al deslizamiento, según la NLT-336 en función del tipo de mezcla.

2004

Mezclas bituminosas en caliente

- **Elección del tipo de ligante:**

La elección del ligante en función de la categoría de tráfico y la zona térmica estival se mantiene respecto el documento anterior. También los ligantes para MAM y la necesidad de ligantes modificados en capas de rodadura de categorías de tráfico T00 y T0. Como novedad se plantea la posibilidad de sustituir algunos ligantes de penetración siempre que estos cumplan las especificaciones: B40/50 por B35/50; B60/70 por B50/70 y B80/100 por B70/100.

- **Elección del tipo de mezcla y espesores:**

Se incrementa el espesor de capa de MAM de entre 6 y 12 cm a entre 7 y 13 cm. Además debe tener un módulo dinámico a 20°C superior a 11000 MPa y cumplir los requisitos de mezclas semidensas.

Se elimina el uso de la mezcla tipo G20 y MAM en capa intermedia y se incrementa el espesor mínimo de la capa intermedia de 5 a 6 cm y el de la capa base de 7 a 9 cm.

- **Contenido mínimo de ligante a emplear:**

Se mantienen respecto de la versión anterior con la consideración de que las MAM ya no son usadas en capa intermedia.

- **Relación ponderal filler/betún:**

Se mantienen las relaciones para mezclas convencionales y de alto módulo.

- **Elección del contenido de ligante (fórmula de trabajo):**

Los ensayos de caracterización para mezclas densas, semidensas, gruesas, de alto módulo y drenantes, así como los límites establecidos para esto no varían respecto a 2001.

Mezclas discontinuas para capa de rodadura

- **Elección del tipo de ligante:**

La elección en función de la categoría de tráfico pesado se mantiene respecto de la versión anterior incluyendo la posibilidad de sustituir: B60/70 por B50/70 y B80/100 por B70/100.

- **Elección del tipo de mezcla y espesores:**

Se mantiene la definición de tamaño máximo y espesores de las mezclas tipo F y M. Se mantiene la indicación de que para carreteras con tráfico T00 a T1 se empleen mezclas tipo M.

- **Contenido mínimo de ligante a emplear:**

Se mantiene para ambas mezclas siendo la misma desde su definición en 1997.

- **Relación ponderal filler/betún:**

Se modifican respecto de la versión anterior reduciendo en 0.1 todos los límites quedando entre 1.3-1.7 para mezclas tipo F y entre 1.1-1.3 para las tipo M.

- **Elección del contenido de ligante (fórmula de trabajo):**

Las temperaturas de calentamiento del ligante se fijan dentro del rango correspondiente a una viscosidad del betún de 150-300 cSt (antes era hasta 190cSt) en el caso de mezclas bituminosas discontinuas con betunes asfálticos y dentro del rango recomendado por el fabricante, en el caso de mezclas con betunes modificados con polímeros.

Se mantiene la necesidad de comprobar en ambas mezclas que no hay escurrimiento de ligante. Los ensayos de caracterización, así como los límites establecidos para estos no varían respecto a 2001 ni para la mezcla tipo F ni para la M.

2008

Mezclas bituminosas en caliente tipo hormigón bituminoso

- **Elección del tipo de ligante:**

Los ligantes a usar en función de la zona térmica estival y la categoría de tráfico pesado se mantienen, aunque se incluye en las tablas betunes modificados con caucho. Los betunes a emplear en mezclas de alto módulo y la necesidad de usar modificados en rodadura para categorías T00 y T0 no varían. Se plantea la posibilidad de sustituir los ligantes: B40/50 por 35/50; B60/70 por 50/70 y B80/100 por 70/100.

- **Elección del tipo de mezcla y espesores:**

Se varía el espesor de la capa fabricada con MAM que ahora será entre 6 y 13 cm que será empleada en categorías de tráfico pesado de T00 a T2 y se limita a un 10% la cantidad de fresaado que pueden incorporar.

A partir de este documento las denominaciones de mezcla cambian. Se hará según la nomenclatura establecida en la UNE-EN 13108-1. Esta designación se complementará con información sobre el tipo de granulometría que corresponda a la mezcla: densa, semidensa o gruesa, con el fin de poder diferenciar mezclas con el mismo tamaño máximo de árido, pero con husos granulométricos diferentes.

Al variar las denominaciones de mezclas, se modifica el rango de espesores para capa intermedia que pasa de entre 6-9 cm a entre 5-10 cm y el de la capa base que pasa de 9-15 cm a 7-15 cm. Además, se vuelve a incluir el uso de mezclas MAM en capa intermedia:

- **Contenido mínimo de ligante a emplear:**

Los contenidos se modifican estando ahora referidas al porcentaje en masa del total de mezcla, no de árido reduciendo así el contenido de ligante de las mezclas de alto módulo. Además, se elimina la distinción de contenidos para capa de rodadura en función de si la mezcla es drenante (este tipo de mezclas ya no se consideran en este apartado) considerando únicamente mezclas densas y semidensas.

A partir de este documento se incluye además una corrección de estos valores en el caso de que la densidad de los áridos sea diferente de $2,65 \text{ g/cm}^3$.

- **Relación ponderal filler/betún:**

Se modifica reduciendo en 0.1 todas las combinaciones de tipo de capa y zona térmica. La relación para mezclas de alto módulo también se reduce pasando de entre 1.3 y 1.5 a entre 1.2 y 1.3.

- **Elección del contenido de ligante (fórmula de trabajo):**

La temperatura de mezclado con betunes asfálticos se fijará dentro del rango correspondiente a una viscosidad del betún de 150-300 cSt.

- Además de la condición de un módulo de rigidez mínimo de 11000 MPa para MAM, se pide realizar ensayo de resistencia a la fatiga con una frecuencia de 30 Hz y a una temperatura de 20°C , según el Anexo D de UNE-EN 12697-24, el valor de la deformación para un millón de ciclos no será inferior a cien microdeformaciones ($\epsilon_6 \geq 100 \mu\text{m/m}$)
- Contenido de huecos: Los límites se mantienen con respecto a los que se establecían en 2001 pero se elimina la evaluación Marshall y el contenido de huecos en áridos. Este último se podrá exigir por el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares, o en su caso el Director de las Obras. Se realizaría según el método de ensayo de la UNE-EN 12697-8 indicado en el anexo B de la UNE-EN 13108-20, siempre que, por las características de los mismos o por su granulometría combinada, se prevean anomalías en la fórmula de trabajo. En tal caso, el contenido de huecos en áridos, de mezclas

con tamaño máximo de 16 mm deberá ser mayor o igual al quince por ciento, y en mezclas con tamaño máximo de 22 o 32 mm deberá ser mayor o igual al catorce por ciento ($\geq 14\%$).

- Resistencia a deformaciones plásticas, determinada mediante el ensayo de pista de laboratorio. Este ensayo se hará según la UNE-EN 12697-22, empleando el dispositivo pequeño, el procedimiento B en aire, a una temperatura de 60 °C y con una duración de 10 000 ciclos (sustituye al ensayo NLT-173). Se analiza la pendiente media de deformación entre 5000 y 10000 ciclos en función de la zona térmica estival y la categoría de tráfico pesado.
- Sensibilidad al agua: la evaluación de la adhesividad árido-ligante ya no depende del tipo de mezcla, sino que hay un único ensayo con valores límite en función del tipo de capa. Para ello, la resistencia conservada en el ensayo de tracción indirecta tras inmersión sustituye al ensayo de inmersión-compresión y al cántabro en mezclas drenantes. Este ensayo se realiza a 15 °C, según la UNE-EN 12697-12, tendrá un valor mínimo del 80% para capas de base e intermedia, y del 85% para capas de rodadura.

Para capas de rodadura, la fórmula de trabajo de la mezcla bituminosa en caliente deberá asegurar el cumplimiento de las características de la unidad terminada en lo referente a la macrotextura superficial (este se evalúa a partir del método del círculo de arena según la UNE-EN 13036-1) y a la resistencia al deslizamiento según la NLT-336. Los valores límite no varían, pero se elimina la referencia a las mezclas drenantes.

Mezclas bituminosas para capas de rodadura. Mezclas drenantes y discontinuas.

• Elección del tipo de ligante:

Depende de la categoría de tráfico y como ocurría con los hormigones bituminosos este se modifica para incluir los ligante con caucho y se incluye la opción de usar ligantes modificados de propiedades análogos. Además, se indica que para categoría T2, se usarán betunes modificados si se trata de autovías o la IMD es superior a 5000 vehículos por día y carril. Se pueden sustituir B60/70 por 50/70 y B80/100 por 70/100.

• Elección del tipo de mezcla y espesores:

De nuevo se cambian aquí las denominaciones de mezclas incluyendo además las mezclas drenantes que hasta este documento se incluían en el artículo anterior. Las mezclas bituminosas discontinuas son aquellas cuyos áridos presentan una discontinuidad granulométrica muy acentuada en los tamices inferiores del árido grueso con tamaño máximo nominal de 8 y 11 mm para capas de rodadura de dos a tres centímetros de espesor (Son las herederas de las mezclas tipo F y M).

En estas mezclas 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 8%.

- **Contenido mínimo de ligante a emplear:**

La dotación mínima de ligante será de 4.3% sobre el total de mezcla para las mezclas tipo PA (PA11 y PA16); 4.75 % para las BBTM tipo B y 5.2 para las BBTM tipo A. También aquí se añade la corrección en función de la densidad de los áridos que es igual a la mencionada para los hormigones bituminosos.

- **Relación ponderal filler/betún:**

Entre 1,2 a 1,6 para las mezclas tipo BBTM A (Se reduce respecto de las tipo F). Entre 1,0 a 1,2 para las mezclas tipo BBTM B Se reduce respecto de las tipo M). Entre 0,9 a 1,1 para las mezclas tipo PA.

- **Elección del contenido de ligante (fórmula de trabajo):**

Los rangos de temperatura de mezclado se modifican respecto de los de hormigones bituminosos. Se fijará dentro del rango correspondiente a una viscosidad del betún de 250-450 cSt en el caso de mezclas discontinuas, de 400-700 cSt en el caso de mezclas drenantes con betunes asfálticos, y dentro del rango recomendado por el fabricante, en el caso de mezclas con betunes modificados con polímeros o con betunes mejorados con caucho.

- Contenido en huecos (UNE-EN 12697-8) empleando probetas compactadas con 50 golpes por cara. Este será mayor del 4% para BBTM A; mayor del 12% para BBTM 11B y mayor del 20% para mezclas drenantes (PA)
- Sensibilidad al agua: resistencia conservada en el ensayo de tracción indirecta tras inmersión (en lugar del ensayo de inmersión compresión o el cántabro tras acondicionamiento), realizado a 15 °C, según la UNE-EN 12697-12, tendrá un valor mínimo del 90% para mezclas discontinuas y del 85% para mezclas drenantes. Las probetas se compactarán según la UNE-EN 12697-30, aplicando 50 golpes por cara.
- En mezclas discontinuas el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares, o en su defecto el Director de las Obras, podrá exigir que la resistencia a deformaciones plásticas determinada mediante el ensayo de pista de laboratorio. Este ensayo se hará según la UNE-EN 12697-22, empleando el dispositivo pequeño, el procedimiento B en aire, a una temperatura de 60 °C y con una duración de 10 000 ciclos (sustituye al ensayo NLT-173). Se analiza la pendiente media de deformación entre 5000 y 10000 ciclos en función de la zona térmica estival y la categoría de tráfico pesado.

- En mezclas drenantes, la pérdida de partículas a 25 °C, según la UNE-EN 12697-17, en probetas compactadas según la UNE-EN 12697-30 con 50 golpes por cara, no deberá rebasar el 20% en masa para las categorías de tráfico pesado T00 a T2 y el 25% en masa en los demás casos. Se mantienen los límites anteriores, pero se extiende la limitación del 20% de pérdida hasta la categoría T2.
- Esgurrimiento del ligante: para mezclas drenantes, deberá comprobarse que no se produce escurrimiento del ligante, realizando el ensayo según la UNE-EN 12697-18. El Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares, o en su defecto el Director de las Obras, podrá exigir también la comprobación sobre el escurrimiento de ligante para las mezclas discontinuas tipo BBTM B.

La fórmula de trabajo de la mezcla bituminosa deberá asegurar el cumplimiento de las características de la unidad terminada en lo referente a la macrotextura superficial obtenida mediante el método del círculo de arena según la UNE-EN 13036-1, y la resistencia al deslizamiento, según la NLT-336. Los límites de estos parámetros no varían.

2014

Hormigones bituminosos

- **Elección del tipo de ligante:**

El tipo de ligante a emplear en función de la categoría de tráfico pesado y de la zona térmica estival se mantiene respecto a la versión de 2008, únicamente se asumen las equivalencias ya propuestas y se cambia la denominación de los betunes modificados.

- **Elección del tipo de mezcla y espesores:**

Se introduce la definición de mezclas semicalientes como aquellas en las que, mediante el empleo de betunes especiales, aditivos u otros procedimientos, permite disminuir la temperatura mínima de mezclado en al menos 40 °C respecto a la mezcla equivalente, pudiendo emplearse en las mismas condiciones y capas que aquéllas en las categorías de tráfico pesado T1 a T4. Se mantienen las denominaciones generales, pero se indica la necesidad de añadir a estas la palabra semicaliente al final en caso de tratarse de mezclas fabricadas en ese rango de temperaturas. Los tipos por capa y espesores se mantienen respecto de la versión de 2008.

Para todos los tipos de mezcla, la cantidad máxima de material fresado que pueden incorporar pasa a ser el 10% al 15% de la masa total de la mezcla.

- **Contenido mínimo de ligante a emplear:**

Se mantiene a excepción de para las mezclas semidensas y gruesas en capa base que se incrementa de 3.65 a 4% por peso de mezcla. La corrección por densidad de áridos permanece.

- **Relación ponderal filler/betún:**

Tampoco varía para ninguna combinación de capa y zona térmica estival ni para las mezclas de alto módulo.

- **Elección del contenido de ligante (fórmula de trabajo):**

La temperatura de mezclado con betunes asfálticos no varía: se fijará dentro del rango correspondiente a una viscosidad dinámica del betún 150-300 cP. Además, en el caso de betunes modificados con polímeros, betunes mejorados con caucho o de betunes especiales para mezclas semicalientes, en la temperatura de mezclado se tendrá en cuenta el rango recomendado por el fabricante. Se incluye la posibilidad de usar además de la compactación vibratoria, la giratoria para mezclas con tamaño nominal D superior a 22 mm. Se plantea la posibilidad de determinar los huecos en mezclas semicalientes con probetas compactadas con giratoria a la temperatura de compactación prevista en obra siempre que se obtenga una densidad geométrica idéntica a la que se obtiene en probetas compactadas aplicando 75 golpes por cara y el número máximo de giros necesario para alcanzar dicha densidad geométrica sea de 160 para mezclas tipo AC32 y AC22 con molde de diámetro interior de 150 mm, o de 100 giros para mezcla tipo AC16 con molde de diámetro interior de 100 mm.

- Contenido de huecos y densidad aparente asociada a ese valor:

Se incluye la posibilidad de usar además de la compactación vibratoria, la giratoria para mezclas con tamaño nominal D superior a 22 mm. Se plantea la posibilidad de determinar los huecos en mezclas semicalientes con probetas compactadas con giratoria con las mismas premisas descritas en el guión anterior.

Los valores de contenido de huecos en mezcla en función del tipo de capa y categoría de tráfico pesado sufren algunas variaciones respecto a documentos anteriores.

Se mantiene la posibilidad de que el Director de obra exija el contenido de huecos en áridos siempre que, por las características de los mismos o por su granulometría combinada, se prevean anomalías en la fórmula de trabajo. Estos valores no cambian.

- Resistencia a la deformación permanente:

Se mantienen las condiciones de ensayo. Los valores de pendiente media se mantienen a excepción de la pendiente para categoría T3 y arcenes en zona térmica media para capas de rodadura e intermedia que pasa de 0.10 a 0.15. No obstante en esta versión se incluyen combinaciones de pendiente y porcentaje de profundidad (PRD), que en algunos casos puede dar por válida la fórmula de trabajo, aunque se supere el valor de pendiente.

- Sensibilidad al agua

Los valores límite para capas base e intermedia ($ITSR \geq 80\%$) y para capa de rodadura ($ITSR \geq 85\%$) se mantienen. Únicamente se introduce que, para mezclas con tamaño máximo superior a 22 mm, las probetas se pueden preparar además de mediante compactación con vibración (norma UNE-EN 12697-32), por compactación giratoria (norma UNE-EN 12697-31).

La exigencia de módulo a 20°C (>11000 MPa) y de resistencia a fatiga con una frecuencia de 30 Hz y a esa temperatura (Anexo D de la norma UNE-EN 12697-24) ($\epsilon_6 < 100$ $\mu\text{m/m}$) para mezclas de alto módulo no varían.

Para capas de rodadura, la fórmula de trabajo de la mezcla bituminosa deberá asegurar el cumplimiento de las características de la unidad terminada en lo referente a la macrotextura superficial y a la resistencia al deslizamiento. Los valores límite no varían, pero la resistencia al deslizamiento lateral pasa de evaluarse según la NLT-336 a evaluarse por la UNE 41201 IN.

Mezclas bituminosas para capas de rodadura. Mezclas drenantes y discontinuas.

- **Elección del tipo de ligante:**

La selección de tipo de ligante en función de la categoría de tráfico pesado y del tipo de mezcla se mantiene sustituyendo la denominación de los ligantes modificados. La única variación es la eliminación del anteriormente denominado BM3a en mezclas drenantes para categoría de tráfico T2 y T31. Se incluye también el fomento de ligantes modificados con PNFU.

- **Elección del tipo de mezcla y espesores:**

Al igual que en el caso de los hormigones bituminosos se incluye la definición de mezclas semicalientes.

- **Contenido mínimo de ligante a emplear:**

La dotación mínima de ligante en porcentaje de masa sobre el total de mezcla no varía.

- **Relación ponderal filler/betún:**

No varía respecto de la versión anterior.

- **Elección del contenido de ligante (fórmula de trabajo):**

El rango de viscosidades para fijar la temperatura de mezclado no varía. Únicamente se añade que para mezclas semicalientes, se tendrá en cuenta el rango recomendado por el fabricante en la temperatura de mezclado y que la temperatura máxima al salir del mezclador no será superior a 140 °C.

- Contenido de huecos y densidad aparente asociada a ese valor.

Al igual que ocurría con los hormigones bituminosos, se incluyen consideraciones relativas a las mezclas semicalientes compactadas con giratoria. Se compactarán hasta el número de giros que permitan obtener una densidad geométrica idéntica a la que se obtiene en probetas compactadas aplicando 50 golpes por cara, en una mezcla en caliente de idénticas características con la excepción del tipo de ligante que deberá ser un betún asfáltico, modificado con polímeros en su caso, del mismo grado que el ligante que se desee emplear en la mezcla semicaliente. Los valores se considerarán válidos siempre que el número máximo de giros necesario para alcanzar dicha densidad geométrica sea de 160 para mezclas tipo drenantes (PA) y de 100 para mezclas tipo discontinuas (BBTM) con molde de diámetro interior de 100 mm.

En relación a los límites, la mezcla BBTM A se mantiene en un contenido de huecos mínimo del 4% y las drenantes (PA) del 20%. Varía la mezcla tipo BBTM 11B que mantiene el mínimo en 12% pero establece un máximo del 18%.

- Resistencia a la deformación permanente

En mezclas discontinuas, el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares, o en su defecto el Director de las Obras, podrá exigir que la resistencia a deformaciones plásticas, cumpla con los valores establecidos. El método de ensayo, condiciones y límites de pendiente media de deformación en función de la categoría de tráfico pesado y la zona térmica estival no varían.

- Sensibilidad al agua.

Se mantiene el valor mínimo ITSR $\geq 90\%$ para mezclas discontinuas y ITSR 85% para mezclas drenantes.

- Escurrimiento del ligante

Se mantiene la necesidad de evaluar para las mezclas drenantes que no se produce escurrimiento del ligante mediante el método de la cesta, realizando el ensayo conforme a la norma UNE-EN 12697-18. El Director de las Obras, en el uso de sus atribuciones, podrá exigir también la comprobación sobre el escurrimiento de ligante para las mezclas discontinuas tipo BBTM B.

La macrotextura superficial (mm), se sigue evaluando mediante el método volumétrico (norma UNE-EN 13036-1), pero la resistencia al deslizamiento transversal (CRT mínimo, %) pasa de seguir la NLT-336 a la norma UNE 41201 IN, pese a eso los valores límite no varían.

2019

Mezclas bituminosas tipo SMA

- **Elección del tipo de ligante:**

Depende de la categoría de tráfico y de la capa en la que se empleará la mezcla (rodadura o intermedia) y como ocurría con el resto de mezclas se contempla y fomenta el uso de betunes con caucho. Además, y al igual que ocurría con las mezclas discontinuas, en capa de rodadura se indica la obligatoriedad de emplear betunes modificados para categorías de tráfico pesado mayores a T2, así como en T2 si se trata de autovías o la IMD es superior a 5000 vehículos por día y carril.

- **Elección del tipo de mezcla y espesores:**

Las mezclas tipo SMA son mezclas que se caracterizan por poseer una gran cantidad de árido grueso, una elevada proporción de ligante y de polvo mineral, una baja cantidad de árido de tamaño intermedio y una pequeña cantidad de aditivo estabilizante. Se emplean en capa intermedia (con un tamaño máximo nominal de 16 mm en capas de entre 5 y 9 cm; y en capas de rodadura de entre 2 y 6 cm (con tamaños máximos nominales de 8, 11 o 16 mm).

En estas mezclas, a diferencia de las de tipo BBTM no se hace mención específica a ningún criterio para asegurar su discontinuidad más allá de los usos recogidos en la Orden.

- **Contenido mínimo de ligante a emplear:**

La dotación mínima de ligante será del 6% sobre el total de mezcla para SMA 8 y SMA 11 en rodadura, 5.8% para SMA 16 en rodadura y 5.6% si la SMA 16 se emplea en capa intermedia. También en este tipo de mezcla aquí se añade la misma corrección en función de la densidad de los áridos incluida en hormigones bituminosos, mezclas discontinuas y drenantes.

- **Relación ponderal filler/betún:**

Se establece una relación ponderal de entre 1.2 y 1.6 para este tipo de mezclas (igual a las BBTM A).

- **Elección del contenido de ligante (fórmula de trabajo):**

El rango de viscosidades para fijar la temperatura de mezclado es el mismo que el definido para las mezclas discontinuas (BBTM) entre 250-450 cSt. Se mantiene aquí lo introducido en 2014 para hormigones bituminosos y mezclas para capa de rodadura relativo a las mezclas semicalientes. En estas se tendrá en cuenta el rango recomendado por el fabricante en la temperatura de mezclado y que la temperatura máxima al salir del mezclador no será superior a 140 °C.

- Contenido de huecos y densidad aparente asociada a ese valor.

Al igual que ocurría con las mezclas discontinuas, se emplearán probetas compactadas por impacto con 50 golpes en mezclas calientes. De igual modo se incluyen las mismas consideraciones relativas a las mezclas semicalientes compactadas con giratoria. Se compactarán hasta el número de giros que permitan obtener una densidad geométrica idéntica a la que se obtiene en probetas compactadas aplicando 50 golpes por cara, en una mezcla en caliente de idénticas características con la excepción del tipo de ligante que deberá ser un betún asfáltico, modificado con polímeros en su caso, del mismo grado que el ligante que se desee emplear en la mezcla semicaliente. Los valores se consideran válidos siempre que el número máximo de giros necesario para alcanzar dicha densidad geométrica sea de 100 (igual que para mezclas tipo discontinuas) con molde de diámetro interior de 100 mm.

En relación a los límites, se establece un rango del 4 – 6 % para rodadura y entre 4 y 7% para capa intermedia.

- Resistencia a la deformación permanente

El procedimiento de ensayo se mantiene con respecto al resto de mezclas (UNE-EN 12697-22, empleando el procedimiento B en aire, a una temperatura de 60 °C y con una duración de 10 000 ciclos). También permanece el uso del criterio de la pendiente media de deformación entre 5000 y 10000 ciclos en función de la zona térmica estival y la categoría de tráfico pesado con unos límites análogos a los de las mezclas BBTM.

- Sensibilidad al agua.

Se establece un valor mínimo ITSR $\geq 90\%$ análogo al de las mezclas discontinuas.

- Escurrimiento del ligante

Para el escurrimiento del ligante, se emplea la misma norma de ensayo que en mezclas drenantes (UNE-EN 12697-18) pero empleando el método del vaso de precipitado (por la habitual presencia de fibras en estas mezclas). Se establece un límite del 0.3 %.

La macrotextura superficial (mm), se sigue evaluando mediante el método volumétrico (norma UNE-EN 13036-1) al igual que en mezclas discontinuas, pero se introduce la posibilidad de evaluarla alternativamente, por el método de perfiles de superficie

(norma UNE-EN ISO 13473-1). Para estos se establecen unos valores mínimos de 0.9 y 0.8 respectivamente. La resistencia al deslizamiento transversal (CRT mínimo, %) mantiene la norma UNE 41201 IN, y se establece un valor de 60, análogo al de mezclas BBTM B.

