

Panorámica de las mezclas bituminosas en carreteras en España. Reseña histórica



Overview of bituminous mixtures on roads in Spain. Historical review

GT9 Mezclas Bituminosas
Comite de Firms ATC

En La evolución de las mezclas bituminosas va unida al desarrollo de la movilidad por carretera. En los últimos 100 años se han convertido en el material de referencia del sector de la pavimentación, habiendo incorporado mejoras en sus características para poder satisfacer las necesidades adicionales que han ido surgiendo a lo largo de los años. A los requisitos tradicionales de resistencia, seguridad y comodidad, se han ido uniendo los de sostenibilidad, resiliencia y conectividad.

¿Cuál era la situación de partida y cómo se ha llegado a la situación actual? ¿Cuál ha sido la evolución de las mezclas bituminosas en estos últimos años?

Pues bien, este artículo es un resumen del documento elaborado en el Grupo de Trabajo 9 “Mezclas Bituminosas” del Comité de Firms de la Asociación Técnica de Carreteras denominado “Evolución histórica de las mezclas bituminosas”, donde se trata de dar una visión de esta evolución teniendo en cuenta los aspectos que tienen influencia en estos productos, desde la fabricación y puesta en obra, con sus avances tecnológicos, hasta el diseño y control de calidad de los productos fabricados.

The evolution of bituminous mixtures is linked to the development of road mobility. In the last 100 years they have become the reference material in the paving sector, having incorporated improvements in their characteristics in order to satisfy the additional needs that have arisen over the years. To the traditional requirements of resistance, security and comfort, those of sustainability, resilience and connectivity have been added.

What was the starting situation and how did it get to the current situation? What has been the evolution of bituminous mixtures in recent years?

This article is a summary of the document prepared in Working Group 9 “Bituminous Mixtures” of the Pavement Committee of the Asociación Técnica de Carreteras called “Historical evolution of bituminous mixtures”, which tries to give a vision of this evolution taking into account the aspects that have an influence on these products, from manufacturing and laying, with its technological advances, to the design and quality control of the manufactured products.

El Comité de Firms de la Asociación Técnica de Carreteras está trabajando, de acuerdo con su Plan de Actividades para el ciclo 2020-2023, en diferentes direcciones tendientes a recopilar la información disponible de las diferentes tecnologías aplicables a la fabricación de mezclas bituminosas. Con el objetivo de la aplicación del Nuevo Enfoque para el diseño, fabricación y extendido de mezclas bituminosas que contempla, además de los requisitos tradicionales de resistencia, seguridad y comodidad, los de sostenibilidad, resiliencia y conectividad, uno de los temas básicos contemplados es la presentación de una panorámica general de las distintas posibilidades tecnológicas existentes actualmente en España para su aplicación en firms de carreteras.

De este trabajo, extenso y probablemente interminable, se ha encargado el grupo de trabajo sobre “Mezclas Bituminosas”.

Como punto de partida, se ha elaborado una reseña histórica que puede ayudar a comprender cuál ha sido la evolución en los últimos años de las mezclas bituminosas, así como la tecnología relacionada con ellas, para llegar a la situación actual. Este artículo pretende ser un resumen del documento redactado, donde se puede encontrar una información más completa.

Creo que es de justicia felicitar al grupo de trabajo por su esfuerzo y por la brillantez del resultado cuya lectura espero que os permita como a mí pasar un buen rato de relajación y aprendizaje y os anime a leer el documento completo.

Javier Payán de Tejada
Presidente del Comité de Firms

1. Introducción

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 la de tener carreteras con capacidad suficiente para 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 trabajando en 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 otras.

Las mezclas bituminosas pueden ofrecer infinidad de soluciones a los retos que se plantean actualmente. Pero, ¿cuál era la situación de partida y cómo se ha llegado a la situación actual?

¿Cuál ha sido la evolución de las mezclas bituminosas en estos últimos años?

Pues bien, el documento denominado “Panorámica de las mezclas bituminosas en carreteras; breve evolución histórica en España” que se ha elaborado en el Grupo de Trabajo 9 de Mezclas Bituminosas, perteneciente al Comité de Firms de la Asociación Técnica de Carreteras, trata de dar esta visión teniendo en cuenta todos los aspectos que tienen influencia en estos productos, desde la fabricación y puesta en obra, con sus avances tecnológicos, hasta el diseño y control de calidad de los productos fabricados.

Así, en este artículo se pretende hacer un breve resumen del documento elaborado, tratando los principales temas comentados en el mismo.

Para empezar a entrar en materia, ¿cuáles son los antecedentes de las actuales mezclas asfálticas?

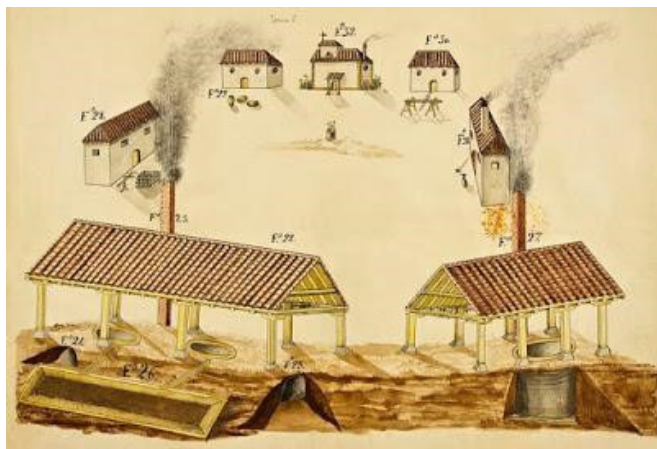


Figura 1. Asfaltos del Volcán- Factoría soriana (OEPM-1851 Privilegio 534)

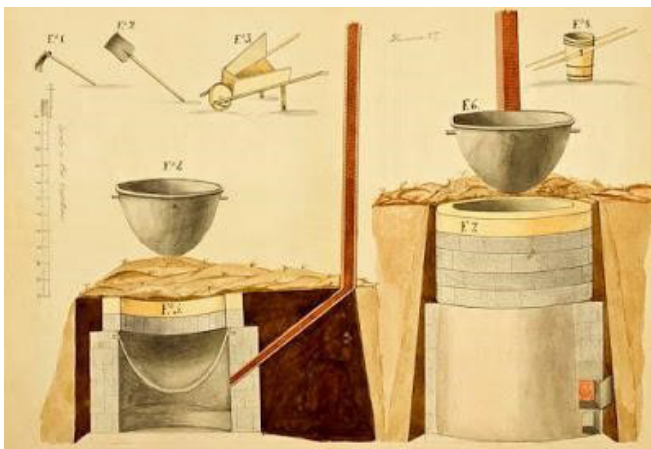
2. Antecedentes en España de las actuales mezclas asfálticas

La utilización de los asfaltos naturales comprimidos en el viario urbano llegó pronto a España, primero aplicando asfaltos naturales importados, como lo ejecutado 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, 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 Campaniense 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.

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 Río¹ 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 Firms Especiales de 1926 también se emplearon mezclas con calizas bituminosas, como las de Maeztu², 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 Firms, no fue hasta el Plan de Modernización de la Red de Carreteras Españolas de 1950 cuando se retomó la mejora de los firms 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 maca-

¹ Del Río, M. - Afirmandos de asfalto natural- Revista de Obras Públicas nº1928, 76, tomo I (2511): 360-361) (1928)

² Aguilar, M. - Ensayos de firms especiales para carreteras- Revista Obras Públicas nº2439 (1925)

dam, 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 de tipo bituminoso en los que se encontraban, bien macadam de penetración hecho in situ con alquitrán o betunes fluidificados, bien mezclas tipo tarmacadam 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 al 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, 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).

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 miedo a las roderas provocó esta reacción y, muchos años después, se ha intentado, aunque quizás no se ha llegado todavía, establecer un término medio en cuanto al 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.

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, 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, las mezclas bituminosas en caliente se adaptan totalmente a la normativa armonizada europea establecida en la serie de normas UN-EN 13108.

Las mezclas en frío

Aunque en las mezclas asfálticas para carreteras hubo un predominio de mezclas en caliente fabricadas 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 fabricadas 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 bacheos³.

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.

3. Fabricación y puesta en obra de las mezclas bituminosas

La evolución que se ha producido y continúa produciéndose en los tipos y características de las mezclas bituminosas no se hubiera alcanzado si el desarrollo de toda la industria relacionada con las mismas, tanto la de fabricación de las plantas bituminosas como la de los equipos de puesta en obra, no hubiese acompañado el proceso.

Primeras plantas y su evolución.

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 se 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, 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 de escasa precisión: el árido era dosificado en cajones y el ligante en cubetas que se vertían sobre un mezclador

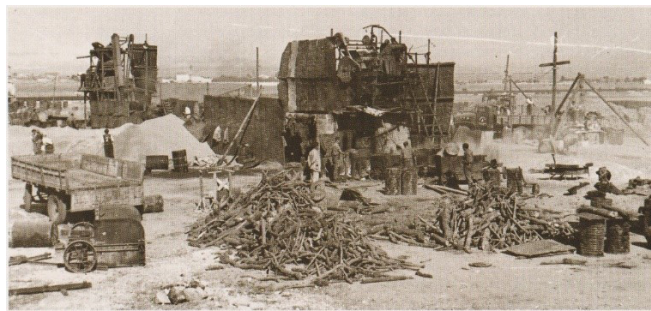


Figura 2. Imagen primeras plantas de mezcla en caliente (circa 1870)

³ Inaraja Arizti, R. - Las emulsiones catiónicas fabricadas a pie de obra. - Revista de Obras Publicas Nº 2669 (1962)

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, posibilitando también manejar de forma controlada un número mayor de fracciones y/o naturaleza de materiales, siendo en la década de los treinta del 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 ma-

teriales, 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 3. Esquema informático del panel de fabricación de plantas de finales del siglo XX

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 ELSAN⁴, fabricada íntegramente por el propio constructor.

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 Arhal (Término Municipal de Morón de la Frontera).

En la zona de Levante, el propulsor en este sector para la fabricación de mezclas bituminosas en calien-

⁴ Entre dos siglos. El legado de Elpidio Sánchez Marcos en el centenario de su nacimiento (salamanca, 1900-2000).

te 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.

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.

En España, tras un 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 encuentra 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.



Figura 4. Planta de Elsan número 5 instalada en Ciudad Real en el año 1945.



Figura 6. Planta de Pavasal instalada en la Comunidad Valenciana (1962).



Figura 8. Fabricación de aglomerado en frío con hormigonera en el año 1951.



Figura 5. Planta de la empresa Rus instalada en Morón de la Frontera (1950).

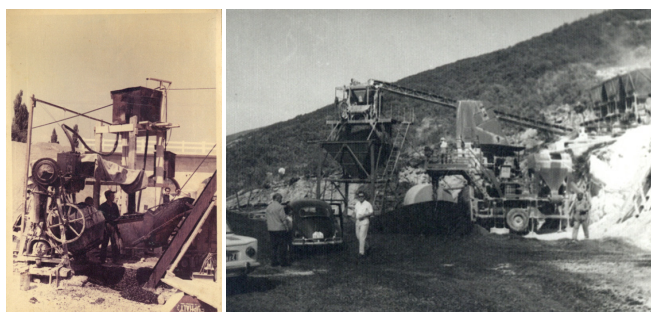


Figura 7. Plantas de fabricación de MBC de Asfaltos Campezo década de los 50.



Figura 9. Máquina MOTO PAVE en el año 1960.

Respecto a la fabricación de las mezclas bituminosas en frío, 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.

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.

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.

Operaciones previas: riego asfáltico y fresado de pavimentos envejecidos.

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.

En la actualidad, el riego manual prácticamente ha desaparecido, generalizándose el empleo de cisternas de riego con rampa.

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 obra.⁵



Figura 10. Bituminadoras para la ejecución del riego asfáltico sobre bases granulares⁶



Figura 11. A la izquierda, cisterna de riego. A la derecha, detalle de los abanicos



Figura 12: Primeras fresadoras en caliente. 1971 (izda) y 1973 (dcha)



Figura 13: Fresadoras en frío. Carga trasera (izda) y delantera (dcha)

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”⁷

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 támpor 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 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.

⁵ www.wirtgen.com

⁶ Archivo propio Rus-Eiffage Infraestructuras

⁷ Escario, J.L. - Caminos (1943)

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 t mper 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  s r o 3D incluyendo el guiado automatizado, y en una mayor capacidad de ancho de extendido, triplicando el de aquella primera extendedora.



Figura 14: Extendedora Modelo 879 de Barber-Greene (1936)⁸

Con el objetivo de avanzar también en la mejora de la calidad del producto final, se han incorporado otro tipo de máquinas al proceso de extendido, como son los silos móviles de transferencia, que mejoran de forma muy importante tanto la homogeneidad térmica como la granulométrica.



Figura 15: Extendido a ancho completo con empleo de silo de transferencia

Compactación de la mezcla asfáltica.

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.

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.

La compactación ha evolucionado hacia la “Compactación inteligente”. 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

⁸ <https://www.constructionequipment.com>

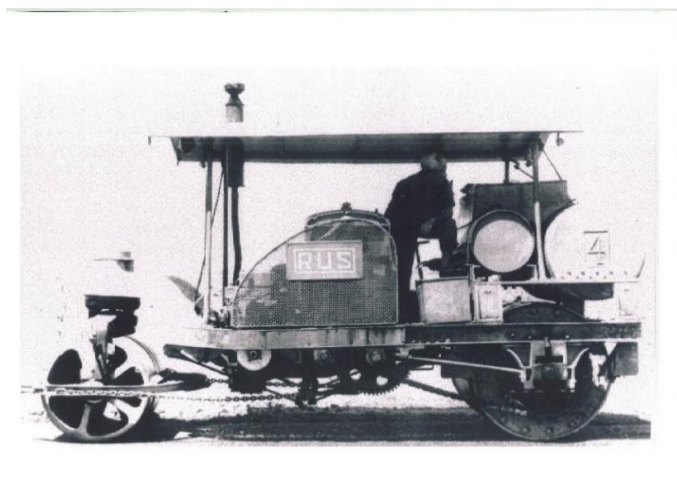
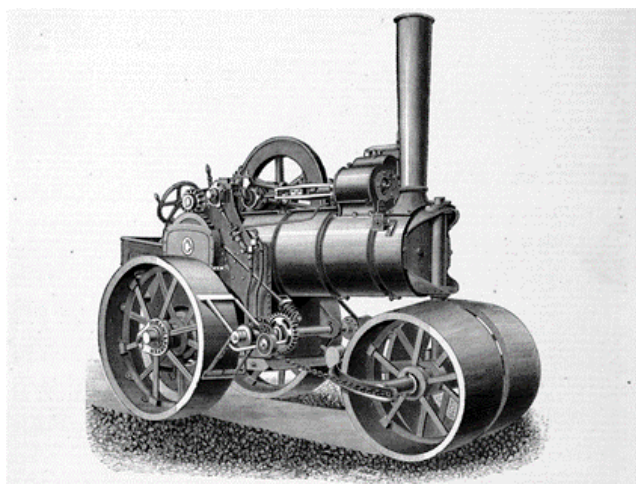


Figura 16. A la izquierda compactador a vapor. Aveling&Porter (1873). A la derecha compactador de motor diesel.

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.

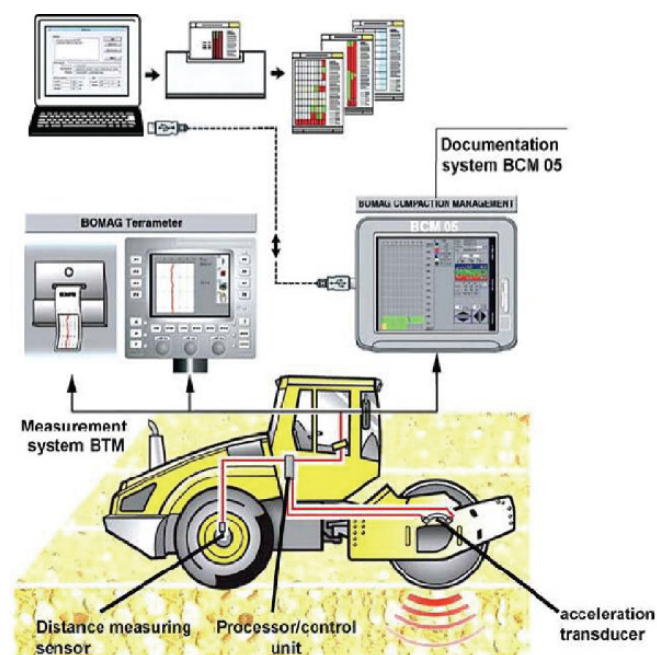


Figura 17: Sistema de Compactación inteligente de BOMAG⁹. (Fuente: www.bomag.com)

4. Diseño y control de calidad de las mezclas bituminosas en España

Tanto el diseño como el control de calidad de las mezclas bituminosas en España ha venido marcado fundamentalmente por la normativa española, especialmente el PG-3. Los criterios de diseño y control 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.

A continuación, se destacan, cronológicamente, algunos de los cambios más importantes que se han producido desde la aparición del PG-3 derivados de las modificaciones normativas.

Para ello, se han empleado líneas de tiempo para diferentes características y parámetros. En el documento completo se pueden encontrar cuadros para los ensayos de diseño y control de las familias de mezclas normalizadas, así como líneas de tiempo de la evolución de los tipos de ligante y su contenido mínimo por tipo de mezcla, además de algunas otras características que se han considerado importantes.

Para este artículo, se incluyen únicamente un par de ejemplos, que se consideran significativos.

⁹ www.bomag.com

Hormigones bituminosos, ensayos de diseño

Marshall: estabilidad y deformación en función tipo tráfico (pesado, medio o ligero)

Marshall: estabilidad y deformación: valores en función de cat. tráfico pesado

Huecos en mezcla: se añade dependencia cat. Tráfico pesado

Huecos en mezcla: en función de capa

Huecos en áridos: se añade mínimo 16% para tamaño máx. árido 8 mm

Huecos en áridos: en función tamaño más árido: >15% para 12; >14% para 20 y >13% para 25

Ensayo pista laboratorio en rodadura e intermedia: máx. Velocidad deformación 105-120 min en función categoría tráfico y zona térmica estival

Huecos en áridos: se aúna el mínimo del 15% para tamaño máx. árido 20 y 25 mm

Ensayo pista laboratorio en rodadura e intermedia (NLT-173): se modifican límites para meter categoría T00

Se introduce el **ensayo de inmersión-compresión:** pérdida resistencia < 25%

Huecos en áridos: pasa a ser optativo si lo exige el Pliego o Director de Obra: >15 % tamaño máx. 16 y >14% para 22 o 32.

Ensayo pista laboratorio a 60°C y 10000 ciclos: pendiente entre 5000 y 10000 ciclos en función cat. Tráfico pesado, capa y zona térmica estival

Sensibilidad al agua a 15°C: resistencia conservada > 80% en base e intermedia; > 85% en rodadura

Huecos en mezcla: se modifican algunos de los límites. Se reduce el rango para capa base un 1%; en capa intermedia se reduce el rango en un 1% para T1 y T2 y el límite superior para T3 y T4. En rodadura se incrementa en 1% el límite sup. Para T3 y T4.

Ensayo pista laboratorio: La pendiente para T3 y arceles en zona térmica media para capas de rodadura e intermedia pasa de 0.10 a 0.15. Se incluyen combinaciones de pendiente y profundidad media que en algunos casos se puede dar por válida la fórmula aunque se supere el valor de pendiente



Se elimina el requisito de huecos para mezcla de tamaño máx. 8 que desaparece

Se cambia inmersión por sensibilidad al agua y el ensayo pista pasa a ser evaluado por la EN-12697-22 B

Tipología de mezcla y espesores

4 tipos: Densas (D), Semidensas (S), Gruesas (G) y Abiertas (A).

Se introduce mezcla D tamaño máx. 8mm

Mezclas P y PA

Tres tamaños árido según espesor capa: 12 (e < 4cm), 20 (4-6 cm) o 25 (>6 cm)

Elección en función tipo capa y espesor

Se introducen **mezclas descont. pequeño espesor.** Tamaño máx. 8-10 cm:

Tipo F capas finas: 2.5-3 cm

Tipo M disc. monogranulares: 1-2 cm

Aparecen mezclas alto módulo (**MAM**). Capas intermedia o base con espesor 6-12 cm

Para D12, S12 y PA12 el espesor mín. rodadura pasa de 3 a 4 cm

Para mezclas descont. En T00 a T1 se usarán mezclas tipo M

MAM: el rango de espesor de capa crece de 6-12 cm a 7-13 cm

En **hormigones bituminosos** el espesor mín. capa interm. pasa de 5 a 6 cm y el de base de 7 a 9 cm.

MAM: el espesor de capa se fija 6-13 cm para T00 a T2. Límite 10% RAP. Se puede volver a usar en intermedia

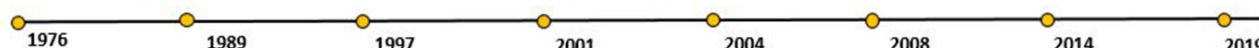
Se cambian denominaciones: AC. Espesores capa intermedia pasa de 6-9 cm a 5-10 cm. En base de 9-15 cm a 7-15 cm. **BBTM**: 2-3cm **PA**: 4-5 cm

Se introducen **mezclas semicalientes** se pueden usar para T1 a T4.

Se incrementa el RAP máx. en MAM al 15%

Se establece para **SMA**:

Espesores de entre 5-9 cm en capa intermedia y entre 2-6 cm para rodadura



Se suprimen D8, A12 y P12

Se elimina G20 y MAM en capa intermedia

Se eliminan F y M (pasan a ser BBTM)

5. Nuevos retos y líneas de investigación

Toda la evolución que se ha producido alrededor de los aspectos relacionados con las mezclas bituminosas ha llevado a la tecnología a la situación actual, existiendo una gran variedad de soluciones, tipos de familias de mezclas, equipamiento y maquinaria y diversidad de metodologías de fabricación. Muchos de estos avances han sido impulsados tanto por las necesidades técnicas y económicas como ambientales, en la búsqueda de soluciones más sostenibles.

Actualmente el conocimiento y la técnica están sufriendo un gran avance, sobre todo motivado por la necesidad de aumentar la sostenibilidad de los firmes asfálticos. En este sentido, se lleva ya tiempo trabajando en la incorporación de mezclas bituminosas fabricadas a menor temperatura, así como en la reutilización de mezclas asfálticas envejecidas en altas tasas, para reducir los gases contaminantes producidos por la fabricación y puesta en obra de las mezclas.

Por otro lado, se han desarrollado nuevos métodos de ensayo que contribuyen a tener una mayor información del comportamiento de las mezclas asfálticas frente a diferentes sollicitaciones, como son ensayos que miden la resistencia de las mezclas a la fisuración (ensayo Fénix), ensayos que miden al mismo tiempo la respuesta estructural y la fisuración por fatiga (ensayo UGR-FACT).

Dar una visión general de la situación actual en cuanto a tipos de mezclas, metodologías de fabricación y técnicas de puesta en obra, así como la propuesta de posibles mejoras para el futuro con las líneas de investigación posibles, es la tarea que actualmente se está realizando en este grupo de trabajo del Comité de firmes de la Asociación Técnica de Carreteras. ❖