

Capítulo 2

FIRMES ASFÁLTICOS. COMPOSICIÓN, DETERIORO Y REHABILITACIÓN

2.1. Introducción

Las carreteras han sido durante décadas el principal medio de desplazamiento de viajeros, y la vía principal para la distribución de mercancías. Al conectar los pueblos y comunidades con las grandes ciudades, y al fortalecer la integración de los países, las carreteras han sido indispensables en el desarrollo de diversas actividades y regiones en todo el mundo.

Actualmente, ante un mundo cada vez más integrado, que intercambia más bienes y servicios, la importancia de las carreteras se ha incrementado notablemente, convirtiéndose en verdaderas vías que impulsan la competitividad de la economía y, también, el desarrollo social. Es por tanto, indispensable contar con infraestructuras de carreteras que aseguren una circulación segura, cómoda y fluida.

Haciendo un poco de historia sobre los orígenes de los firmes asfálticos, podemos comentar que el empleo del alquitrán para la pavimentación de carreteras se remonta al

año 1830 cuando fue empleado en algunos riegos superficiales, sin embargo, los primeros aglomerados realizados in situ con alquitrán se ejecutaron hacia 1850 en algunas carreteras y vías urbanas del Reino Unido.

Hacia 1870 se empezaron a realizar en Estados Unidos mezclas fabricadas a partir de rocas asfálticas y de asfaltos naturales, si bien estos materiales ya habían sido utilizados en 1810 en algunas pavimentaciones en Francia.

También hacia 1870, como consecuencia del desarrollo de la industria del petróleo, se comenzaron a emplear betunes de destilación para la fabricación de mezclas, pero fue a finales del siglo XIX, cuando el norteamericano C. Richardson, sentó las bases de la tecnología de las mezclas bituminosas para pavimentación. Sin embargo, la industria de la fabricación en planta no se desarrolló hasta después de la I Guerra Mundial. De la misma forma, durante la II Guerra Mundial, las técnicas y los equipos para la fabricación de mezclas bituminosas se desarrollaron enormemente, este fenómeno se derivó principalmente de las necesidades de construcción acelerada de las pistas de aterrizaje militares.

En España, las primeras pavimentaciones con alquitrán se realizaron entre 1847 y 1854 en la Puerta del Sol de Madrid, pero no fue hasta 1926 cuando se emplearon mezclas bituminosas de forma significativa en la pavimentación de más de 200 km de carreteras en el llamado Circuito Nacional de Firmes Especiales.

Actualmente las mezclas bituminosas se emplean no sólo como pavimentos de calles y carreteras, sino en un sinnúmero de infraestructuras, tales como aeropuertos, superficies industriales, aparcamientos, pistas deportivas, etc.

Para dar una idea de la importancia de las carreteras, mencionaré algunos datos relevantes acerca de la infraestructura viaria española. La red de carreteras española está formada por unos 163,577 km, en los que se incluyen autopistas de peaje y libres, autovías, carreteras de doble calzada y carreteras convencionales. Por otro lado se tienen unos 489,698 km de calles y carreteras urbanas gestionadas por los Ayuntamientos. Por

dichas infraestructuras, transitan cerca del 90% del tráfico interior de viajeros y más del 80% del tráfico interior de mercancías (Ministerio de Fomento <www.mfom.es>).

Dada la importancia de las carreteras dentro de la economía de un país, ya que los costes de transporte de viajeros y mercancías dependen en gran medida de los deterioros que presenten los pavimentos, es fundamental mantener las características de las carreteras de la mejor manera posible, para evitar elevar los costes de operación de los vehículos que transitan por ellas.

Las características iniciales de toda carretera ya sea de nueva construcción o después de una reparación, se van degradando con el transcurso del tiempo. Son diversos factores los que inciden y determinan este proceso de deterioro. Por una parte tenemos los factores relacionados directamente con las características del propio firme como pueden ser los espesores, los materiales utilizados en su fabricación y el proceso de ejecución, que podríamos considerar como los factores pasivos del proceso, y por otra parte tenemos los factores activos, verdaderos causantes del deterioro, que son el tráfico y los factores ambientales.

Los factores activos de deterioro son dos variables complejas, y difíciles de definir, que dependen de un conjunto diverso de elementos, así pues, el tráfico está unido al número de ejes, a la carga por eje, a la velocidad de circulación de los vehículos, a la regularidad superficial del firme, etc.

Los ejes actúan sobre el pavimento transmitiendo una sollicitación horizontal y otra vertical, lo cual se traduce en el tiempo en un deterioro del firme que se manifiesta principalmente en los siguientes tipos de fallo:

- Fisuración por fatiga
- Desprendimiento de gravillas o pulimento de los áridos
- Deformaciones permanentes
- Hundimiento de gravillas
- Baches y peladuras

Por otra parte, los factores ambientales someten a los firmes de carreteras a una serie de agresiones externas que afectan la durabilidad de la mezcla, tal es el caso de la radiación solar, las variaciones diarias y estacionales de la temperatura, la oxidación del ligante producida por el aire y el agua, las heladas y las sales fundentes empleadas contra las mismas, el derrame de aceites y combustibles, entre otros.

Estos factores no siempre son tomados en cuenta en el dimensionamiento y conservación de los firmes, pero su efecto puede tener especial importancia en su deterioro ya que ayudan a que se presenten problemas como:

- La desenvuelta de las mezclas
- La fisuración por esfuerzos térmicos
- La fisuración y degradación superficial por efecto del hielo
- La pérdida de capacidad portante de la explanada en épocas de deshielo o lluvia
- Los posibles deterioros en invierno por acción de fundentes químicos, etc.

Es importante hacer una distinción entre dos clases de fallos que se pueden presentar en un firme. De acuerdo con Yoder y Witczak (1975), el primer tipo, denominado “*fallo estructural*”, incluye un colapso de la estructura del firme o de uno o más de sus componentes, lo que los hace incapaces de soportar las cargas impuestas en su superficie por el tráfico. El segundo, denominado como “*fallo funcional*”, puede o no estar acompañado del fallo estructural, pero es tal, que causa grandes esfuerzos sobre los vehículos que transitan sobre el firme, y una gran incomodidad de sus pasajeros debido a su gran rugosidad.

La durabilidad de los firmes asfálticos se define como la resistencia que tienen en el tiempo, y aunque en este momento es imposible evitar su deterioro, se puede alargar su durabilidad mediante las técnicas actuales de rehabilitación y reciclado hasta horizontes de vida muy prolongados.

Para lograr alargar el horizonte de vida de los firmes asfálticos, es indispensable conocer los factores que afectan sus características, así como las variaciones de sus

propiedades en el tiempo, para poder llevar a cabo las actuaciones de rehabilitación adecuadas en cada caso.

En este capítulo se describen las principales causas y los tipos de deterioro más comunes que se presentan en los firmes bituminosos, y la manera en que afectan a sus propiedades. Por otra parte, también se mencionarán brevemente las principales técnicas utilizadas para la rehabilitación de firmes flexibles y los casos en que se utiliza cada uno de ellos.

2.2 Firmes asfálticos

Los firmes de carreteras están formados por un conjunto de capas superpuestas, relativamente horizontales y de varios centímetros de espesor, de diferentes materiales, adecuadamente compactados, que se apoyan sobre una explanada obtenida por el movimiento de tierras (Kraemer et al., 1999).

Los firmes deben proporcionar una superficie de rodadura segura, cómoda y de características permanentes que soporten las cargas del tráfico rodado durante un período de tiempo determinado. Deben repartir las presiones impuestas por el tráfico pesado, de forma que a la explanada sólo llegue una pequeña parte de aquellas, compatible con su capacidad de soporte y además deben proteger a la explanada de la intemperie y en especial de las precipitaciones.

Los firmes de carreteras deben cumplir con una serie de características funcionales, que corresponden prácticamente a las de la superficie del pavimento o capa de rodadura y que afectan directamente a los usuarios. Las principales características superficiales que los firmes deben reunir son una adecuada resistencia al deslizamiento, una buena regularidad superficial del pavimento tanto transversal como longitudinal, un reducido ruido de rodadura, unas propiedades de reflexión luminosa adecuadas para la conducción nocturna, y un desagüe superficial rápido para evitar el hidroplaneo y las proyecciones de agua a otros vehículos.

Por otra parte, las características estructurales de los firmes están relacionadas con las de los materiales empleados en sus diferentes capas y con sus espesores. Su diferente deformabilidad da lugar a discontinuidades de tensiones y/o deformaciones en los planos de contacto, por lo que el proyecto de una capa ha de armonizarse con el de las restantes a fin de conseguir un buen comportamiento estructural conjunto.

Los firmes de carreteras se diferencian y clasifican de acuerdo a los materiales que los componen y a la forma que tienen de distribuir los esfuerzos y deformaciones generados por el tráfico.

Siguiendo los criterios tradicionales, suelen clasificarse en dos grandes grupos, firmes flexibles y firmes rígidos, en éste trabajo nos centraremos en los firmes flexibles o asfálticos que están formados por una serie de capas granulares y por lo menos por una capa bituminosa de rodadura. Inicialmente la resistencia a la deformación de las capas de los firmes flexibles era decreciente con la profundidad, de modo análogo a la disminución de las presiones transmitidas desde la superficie, sin embargo, el aumento del tráfico y de las cargas generadas por él, han llevado a la creación de firmes semirrígidos, con capas tratadas con cemento o con un espesor importante (15 cm o más) de mezclas bituminosas (semiflexibles). Los firmes semirrígidos y semiflexibles se incluyen en el grupo de los flexibles ya que contienen un pavimento bituminoso, pero su comportamiento estructural es diferente, con capas inferiores de igual o mayor rigidez que las superiores.

Los firmes flexibles constan de varias capas denominadas de arriba abajo pavimento, base y subbase respectivamente. El pavimento, constituido por una o dos capas de mezcla bituminosa denominadas capa de rodadura y capa intermedia, es la parte superior del firme y la que soporta directamente las solicitaciones del tráfico, aportando además las características funcionales. El pavimento tiene la función estructural de absorber los esfuerzos horizontales y parte de los verticales.

La base es la capa del firme situada debajo del pavimento y su función es eminentemente resistente, absorbiendo la mayor parte de los esfuerzos verticales. Para tráfico medios y ligeros se utilizan las bases granulares de macadam o zahorra artificial, para tráfico pesados se emplean materiales tratados con un ligante o conglomerante. Además de los anteriores, existen algunos tipos especiales de base como pueden ser la gravaescoria, gravaemulsión, gravacaliza y suelocemento.

Por último, la subbase es la capa situada debajo de la base y sobre la explanada, su función es proporcionar a la base un cimiento uniforme, además de cumplir con una función drenante. Esta capa puede no ser necesaria con explanadas granulares de elevada capacidad de soporte. La subbase puede estar constituida por gravas y arenas

naturales o de machaqueo, suelos estabilizados con cemento, escorias cristalizadas de horno alto, etc.

2.2.1 Mezclas bituminosas

Los firmes flexibles son los más utilizados actualmente en España, por lo tanto, las mezclas bituminosas tienen una gran importancia, no solo por los grandes volúmenes que se utilizan en su construcción sino por el alto valor que tienen y por que los usuarios transitan directamente sobre ellas. Las mezclas bituminosas son empleadas en los firmes flexibles para formar las capas de rodadura o las capas intermedias, y en los firmes semiflexibles se utilizan además como capas de base.

Las mezclas bituminosas, también llamadas aglomerados bituminosos, están formadas básicamente por una combinación de áridos y un ligante hidrocarbonado, de manera que las partículas quedan cubiertas por una película continua de betún.

Actualmente existen diferentes clasificaciones para las mezclas bituminosas en función del parámetro que se considere para establecer las diferencias entre ellas, en la tabla 2.2.1 se observan diferentes tipos de clasificaciones utilizados en España.

Tabla 2.2.1 Clasificación de las mezclas bituminosas (*Fuente: Kraemer et al. 1999*)

	Tipo de mezcla
Fracciones de árido empleadas	Mástico Mortero Macadam Hormigón
Temperatura de puesta en obra	En frío En caliente
% de huecos en mezcla	Cerradas ($h < 6$) Semicerradas ($6 < h < 12$) Abiertas ($h > 12$) Porosas ($h > 20$)
Tamaño del árido	Gruesas ($t_{\text{máx}} > 8 \text{ mm}$) Finas ($t_{\text{máx}} < 8 \text{ mm}$)
Estructura del árido	Con esqueleto mineral Sin esqueleto mineral
Granulometría	Continuas Discontinuas

En éste trabajo nos centraremos básicamente en las mezclas bituminosas en caliente, empleadas tanto en vías urbanas como en autopistas, y carreteras de todo tipo. Lógicamente, para tal variedad de aplicaciones existen mezclas en caliente con muy diferentes características. La mayor parte de ésta clase de mezclas normalizadas en España tienen diversas granulometrías sensiblemente continuas, y están formados básicamente por árido grueso, árido fino, filler y betún (Kraemer et al. 1999).

La existencia de un cierto porcentaje de huecos en las mezclas bituminosas, después de su compactación, es muy importante para evitar que se generen deformaciones plásticas como consecuencia del paso de las cargas y de los cambios de temperatura. En España, las mezclas normalizadas deben tener más de un 3% de huecos en mezcla; si dicho porcentaje no supera el 6% se habla de mezclas densas y cuando superan el 12% se consideran abiertas, finalmente si el porcentaje de huecos es superior al 20% se denominan mezclas drenantes o porosas.

El tamaño máximo del árido es otro factor importante dentro de la clasificación de las mezclas bituminosas, y cabe distinguir dos grupos principales, las mezclas gruesas con un tamaño máximo de áridos que excede los 8 mm, y las finas en las que el tamaño máximo no supera dicho valor. La mayoría de las mezclas normalizadas en España son mezclas gruesas con tamaños máximos nominales de áridos especificados en 10, 12, 20 y 25 mm. Cabe mencionar que todas las mezclas bituminosas que se estudiarán en este trabajo son mezclas consideradas gruesas dentro de esta clasificación, ya que tienen tamaños máximos de áridos superiores a los 10 mm.

Las mezclas bituminosas tienen una serie de características que el ingeniero debe adaptar a cada caso, tomando en cuenta las cualidades de los materiales constituyentes, su dosificación y las condiciones de fabricación y puesta en obra. En todo caso, la primera característica que debe tener toda mezcla bituminosa es la de ser capaz de soportar las cargas y de resistir las tensiones producidas con unas deformaciones tolerables. Esta propiedad se denomina estabilidad y representa la resistencia intrínseca del material, es decir, la combinación de su rozamiento interno y de su cohesión.

Además de la estabilidad, las mezclas bituminosas deben presentar otras características muy importantes entre las que se pueden mencionar una resistencia a las deformaciones plásticas, resistencia a la disgregación, resistencia a la fatiga, flexibilidad, una adecuada resistencia al deslizamiento, impermeabilidad en el caso de las mezclas cerradas y permeabilidad en el caso de las drenantes y una resistencia adecuada a los agentes externos (durabilidad).

Todas las características que deben cumplir las mezclas bituminosas, deben ser estudiadas durante su diseño y controladas adecuadamente durante su fabricación y puesta en obra, para garantizar la calidad de los firmes en los que serán utilizadas.

Desgraciadamente, todas las características iniciales de las mezclas bituminosas comienzan a degradarse apenas se abren al tráfico los tramos de carretera, por lo tanto, es muy importante analizar los procesos de deterioro que presentan los firmes para poder llevar a cabo las actuaciones adecuadas de mantenimiento o rehabilitación en cada momento de su vida.

2.3. Deterioro de los firmes asfálticos

Cuando hablamos de firmes asfálticos nos referimos al conjunto de capas que los componen, que pueden variar, como se ha mencionado anteriormente, desde el terreno natural, o capas granulares simplemente compactadas, hasta las capas de materiales granulares aglomerados con productos bituminosos.

Las causas de que los firmes se degraden están en la insuficiencia de capacidad de los materiales que lo conforman para soportar sin rotura las tensiones y deformaciones que origina una determinada sollicitación (ordinariamente cargas del tráfico, modificaciones de forma debidas a asentamientos o a hinchamientos, o cambios de temperatura), o en la pérdida de cohesión de los aglomerantes bituminosos por acciones diversas como cambios de temperatura, por efecto del agua o el envejecimiento (ACESA, 1983).

Debido a la naturaleza tan diversa de los materiales que forman parte de cada una de las capas del firme y de la influencia que tiene su comportamiento en la forma en la que evolucionarán sus características, es necesario tener en cuenta como se comporta cada una de ellas y de que manera influyen en la degradación del firme.

Iniciando con la explanada, que nos servirá como cimiento, y cuya influencia en la integridad estructural del firme puede ser muy grande, hay que tener en cuenta que estará ordinariamente constituida por el tipo de material de los terrenos sobre los que se asienta la carretera.

En el caso de que la explanada esté formada por materiales cohesivos, pueden generarse procesos lentos de asentamiento y cambios alternativos de volumen y de capacidad portante con la incorporación y eliminación de agua procedente de lluvias, deshielo, o del subsuelo. Por otra parte, si contiene materiales establecidos de forma inestable, desigualmente compactados, o que permitan el paso de agua con arrastre de finos, etc., pueden ocasionar también degradaciones de los firmes situados encima de ellos.

Dentro de las capas propiamente del firme, las granulares, poseen una capacidad limitada para soportar, sin rotura de su estructura ni desplazamiento de sus granos, las presiones verticales. La repetición de cargas produce una compactación adicional en estas capas, que decrece, generalmente, con el logaritmo del número de repeticiones. Dichas cargas, producen también en estas capas, una deformación elástica, con módulos de elasticidad bajos, que crece con la magnitud de la carga hasta ocasionar el desplazamiento de las partículas o la rotura. Los materiales granulares no tienen capacidad para soportar esfuerzos a tracción, y su resistencia ante esfuerzos horizontales, depende de las condiciones de confinamiento en que se encuentren.

Las capas constituidas con materiales granulares aglomerados con cemento (gravas cemento, hormigones, etc.), suelen ser notablemente rígidas, con un comportamiento esencialmente elástico y módulos de elasticidad elevados. Estas capas, utilizadas en los firmes semirrígidos, sufren agrietamientos por diversos motivos (no tomaremos en cuenta los gradientes de temperatura y humedad, ya que en los firmes que consideramos, estos materiales no se encuentran nunca en la superficie) como la retracción, las deformaciones de las capas inferiores por asientos o hinchamientos, y la acción de las cargas de tráfico. Los agrietamientos en estas capas, se producen cuando los esfuerzos de tracción generados sobrepasan la capacidad de resistencia del material aglomerado. La capacidad de resistencia decrece con el logaritmo del número de repeticiones de carga, a este efecto se le conoce como fatiga.

Los materiales granulares aglomerados con productos bituminosos (mezclas bituminosas) que constituyen el pavimento propiamente dicho, son la parte más costosa de los firmes flexibles, por lo tanto se debe tener especial atención en su deterioro y rehabilitación. Estas capas tienen un comportamiento viscoelástico complejo y en su deterioro intervienen diferentes factores. Por un lado, la presencia de agua disminuye la cohesión que el ligante comunica a la mezcla, por otro, la temperatura disminuye la viscosidad del ligante y la rigidez de la mezcla, y por último, el envejecimiento del betún aumenta la rigidez de la mezcla sin aumentar el valor de su deformación elástica, lo que puede dar lugar a su agrietamiento y posterior rotura.

La capacidad de las mezclas bituminosas para soportar deformaciones unitarias sin rotura, varía también con el logaritmo del número de repeticiones de carga. Por otra parte, las pequeñas deformaciones plásticas que se generan en cada solicitud, sin daño del material, debidamente acumuladas, pueden dar lugar a formar deformaciones totales que afecten el correcto comportamiento del firme.

Rico y Del Castillo (1989), dividen las fallas de los firmes flexibles en tres grupos fundamentales, con un origen bien diferenciado:

Fallas por insuficiencia estructural

Se trata de firmes contruidos con materiales de menor resistencia a la necesaria o con materiales de buena calidad, pero con espesores insuficientes. En términos generales ésta es la falla que se produce cuando las combinaciones de la resistencia al esfuerzo cortante de cada capa y sus respectivos espesores no son suficientes para establecer un mecanismo de resistencia adecuado que soporte las cargas a las que serán sometidos.

Fallas por defectos constructivos

Se trata de firmes quizá bien proporcionados y formados por materiales suficientemente resistentes, pero en cuya construcción se han producido errores o defectos que llevan al fallo del firme.

Fallas por fatiga

Se trata de firmes que originalmente estuvieron quizá en condiciones apropiadas, pero que por la continuada repetición de las cargas del tránsito sufrieron efectos de fatiga, degradación estructural y, en general, pérdida de resistencia y deformación acumulada. Estos fallos están grandemente asociados al número de repeticiones de la carga, pero resultan claramente influidas por el tiempo de servicio y el envejecimiento del ligante.

Sin importar el origen de las fallas, éstas pueden manifestarse en cualquiera de los tipos fundamentales que son, el fracturamiento (fisuración), las deformaciones permanentes, o la desintegración.

El tipo de falla que presentará un firme con una determinada deficiencia dependerá de cómo se conjuguen en cada caso, los efectos del tráfico, las características mecánicas y la estructuración de los materiales del firme, y el apoyo de las capas inferiores, del terraplén o, en última instancia de la explanada.

A continuación se describirán algunas de las fallas más comunes que presentan los firmes asfálticos, poniendo especial cuidado en aquellos que requieren de una actuación de rehabilitación estructural, ya que son los tipos de fallos en los que se suele realizar un fresado de las capas del pavimento con lo que se obtiene un material de buena calidad que puede ser reciclado.

Aunque no se mencionarán todos los tipos de fallas que se presentan en los firmes flexibles, servirán para dar una clara idea de los principales mecanismos de deterioro que presentan. Cabe mencionar que se pueden encontrar variaciones de cada uno de los tipos que se mencionarán y que la combinación de dos o más de ellos en un mismo firme es posible.

2.3.1. Tipos de fallos en los firmes bituminosos

De forma general, puede decirse que un firme flexible sometido al paso repetido de vehículos pesados, sufre una serie de deformaciones en las capas de mezcla bituminosa que se transforman en esfuerzos de tracción. La acumulación de estos esfuerzos en dichas capas, dan origen a la formación de microfisuras que con el tiempo fracturan todo el espesor del pavimento, debilitando su estructura y permitiendo el acceso del agua a las capas inferiores, lo que afecta su capacidad de soporte y permite la aparición de deformaciones permanentes en estas capas. Como consecuencia de todo lo anterior el firme deja de cumplir adecuadamente con su función.

Esta es una descripción resumida del proceso de deterioro general que presentan los firmes flexibles, sin embargo, existen una gran cantidad de fallos que se pueden presentar a lo largo de su vida de servicio. En primer lugar podemos mencionar los fallos superficiales que afectan principalmente las características funcionales de los firmes y que normalmente no disminuyen su capacidad de soporte.

Fallas superficiales

Los firmes bituminosos pueden presentar una serie de fallas localizadas en su superficie que repercuten de forma negativa en la calidad del servicio prestado a los usuarios (adherencia, regularidad, drenaje superficial, etc.). Estos fallos se deben principalmente a la acción abrasiva del tráfico, al envejecimiento y a los agentes atmosféricos, aunque algunas veces se pueden deber al empleo de materiales inadecuados o a una mala ejecución. Algunas de las más comunes son las siguientes:

- Pérdida de microtextura
- Pérdida de macrotextura
- Peladuras y descarnaduras
- Desprendimientos de áridos
- Deformaciones de la capa de rodadura (roderas)
- Baches
- Exudaciones de ligante

Además de los fallos superficiales antes mencionados, existen una serie de deterioros en los firmes bituminosos que se relacionan con una disminución apreciable de las características iniciales y que pueden afectar la capacidad estructural del firme, la mayoría de ellas se presenta en forma de fisuras o deformaciones permanentes y suelen afectar a más de una capa del firme, requiriendo de una rehabilitación más profunda que en muchos casos puede incluir el fresado de parte del pavimento. Algunos de los fallos más comunes de éste tipo son los siguientes:

Fisuración en piel de cocodrilo

Se trata de un agrietamiento que se extiende sobre toda la superficie de rodadura, o sobre una parte muy substancial de ella, por el cual dicha superficie adquiere el aspecto que da nombre al fenómeno tal como se muestra en la figura 2.3.1.

Esta falla es originada generalmente por fatiga. El agrietamiento en “piel de cocodrilo” suele presentarse en firmes construidos sobre explanadas resilientes. También es típico de firmes con bases débiles o insuficientemente compactadas.

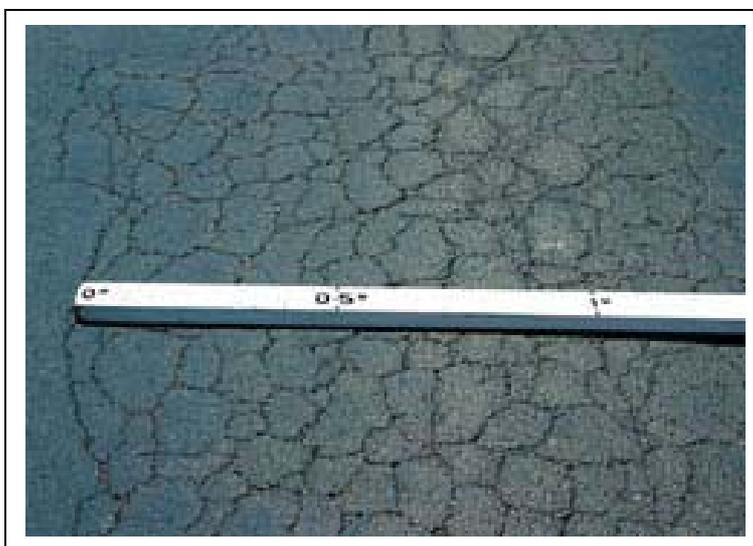


Fig. 2.3.1 Fisuración en piel de cocodrilo (Fuente: *Aircraft pavement maintenance manual*, 1997)

El fenómeno puede ser o no progresivo; cuando lo es, termina en destrucciones locales del pavimento, que comienzan por desprendimientos de la carpeta en lugares localizados y en la rápida remoción de los materiales granulares expuestos. Cuando el fenómeno alcanza estos grados destructivos puede decirse casi con seguridad que está ligado a deficiencias estructurales en la base. En lugares donde el congelamiento es un factor relevante, el agrietamiento es frecuente si se utilizan materiales susceptibles. También puede ser indicativo de lugares que requieren subdrenaje.

Al estudiar este tipo de agrietamiento resulta esencial determinar si se trata de un fenómeno evolutivo. En general, los procesos asociados a envejecimiento y fatiga de las capas bituminosas progresan muy lentamente; en cambio son muy rápidas las evoluciones del fenómeno asociadas a deficiencia estructural o a exceso de agua.

Fisuración en bloque

Este fallo es similar al de piel de cocodrilo, pero con una apertura de malla más amplia que en el caso anterior, con un tamaño aproximado de bloques de 25 por 25 centímetros, como se aprecia en la figura 2.3.2.



Fig. 2.3.2 Fisuración en bloque (*Fuente: Aircraft pavement maintenance manual, 1997*)

Es importante mencionar que la fisuración en forma de malla gruesa puede originarse por un dimensionamiento insuficiente de la sección del firme, o simplemente puede haberse producido por el despegue de la capa superior de mezcla asfáltica, por una mala ejecución o una deficiente dosificación del riego de adherencia. En este caso, la capa despegada trabaja de forma aislada del resto, por lo que llega a la fatiga aunque el resto del firme esté en buen estado y con una elevada capacidad portante.

Fisuración longitudinal

Consiste en la aparición de grietas longitudinales de poca abertura (aprox. 0.5 cm), generalmente en toda el área que corresponde a la circulación de las cargas pesadas.

Agrietamientos como este pueden deberse a movimientos de las capas de firme que tienen lugar predominantemente en dirección horizontal; el fenómeno puede ocurrir en la base, sub-base o, con cierta frecuencia, en la explanada. Son indicativos de fenómenos de congelamiento y deshielo o de cambios volumétricos por variación del contenido de agua.

Es posible que también aparezcan fisuras longitudinales o de gran curvatura en el caso de producirse un asiento importante en el terreno subyacente o un círculo de rotura que pase por la calzada. En el caso de fisuras longitudinales situadas en la zona de rodadas, su origen puede ser debido a la falta de capacidad portante del firme, como paso inicial a la formación de la fisuración en piel de cocodrilo como se observa en la figura 2.3.3.



Fig. 2.3.3 Fisuras longitudinales (Fuente: Hardin Paving Company <www.hardinpaving.com>)

Las fisuras longitudinales tienen un desarrollo que comienza con ramificaciones, pérdida de material del borde de la fisura y formación de fisuras secundarias cerca de la principal.

Fisuración transversal

Las fisuras transversales pueden ser ocasionadas por el paso del tráfico o por otro tipo de causas, principalmente por asentos de terraplenes, por fisuración térmica, por el reflejo de fisuras de capas profundas cementadas, por defectos de extendido, etc.

A continuación se presenta la figura 2.3.4 en la que se observa la fisuración transversal de un firme.



Fig. 2.3.4 Fisuras transversales en un pavimento asfáltico (Fuente: Flynn Brothers <flynnbrothers.com>)

Hundimiento de la superficie del firme (surcos)

Esta falla se asocia frecuentemente al aumento de compacidad en las capas granulares de base o sub-base, debida, a su vez, a una carga excesiva, a cargas repetidas (aumento de compacidad por vibración) o a la rotura de las partículas. También puede deberse a la consolidación de la explanada. En general, el ancho del surco excede al del neumático y tiende a ser mayor en comparación a este, cuanto más profundo se localiza el problema que lo genera.



Fig. 2.3.5 Hundimiento de la superficie de un firme bituminoso (Fuente: *Aircraft pavement maintenance manual*, 1997)

No deben confundirse las deformaciones a las que se está haciendo referencia con las roderas producidas por simple desplazamiento lateral de una mezcla bituminosa defectuosa, la diferencia básica es que en un surco de origen profundo no se eleva la mezcla a los lados del surco como se aprecia en la figura 2.3.5.

Fallas por cortante

Están típicamente asociadas a la falta de resistencia al esfuerzo cortante en la base o sub-base del firme y más raramente en la explanada. Consisten generalmente en surcos profundos, nítidos y bien marcados, cuyo ancho no excede mucho al del neumático. En este caso suele haber también elevación del material de la capa de rodadura a los lados del surco, pero la falla se distingue fácilmente de un simple desplazamiento de material bituminoso por la mayor profundidad afectada.

Consolidación del terreno de cimentación

La consolidación de terrenos de cimentación blandos puede producir distorsión del firme, independientemente de los espesores o de la condición estructural del mismo. Las deformaciones de la sección transversal pueden producir agrietamientos longitudinales. Cuando por falta de resistencia en el terreno de cimentación, se compromete la

estabilidad de los terraplenes, también se producen agrietamientos típicos con trayectoria circular, marcando lo que podrá llegar a ser la cabeza de la falla eventual.

Fallas por presencia prolongada de agua en el firme

De acuerdo con Yoder y Witczak (1975), en zonas de bajas temperaturas que presentan acumulación de nieve durante el invierno, suelen presentarse en primavera grandes acumulaciones de agua al lado de las carreteras debido al deshielo, este fenómeno puede producirse también en zonas muy lluviosas o en firmes con problemas de drenaje. Debido a este exceso de agua, las capas del firme se debilitan, permitiendo movimientos excesivos del pavimento y provocando pérdida de cohesión de las mezclas bituminosas que se transforman en una degradación de la capa de rodadura.

Todas las fallas que se han descrito en este apartado afectan de una u otra forma a los usuarios de las infraestructuras viarias, por lo tanto, es necesario desarrollar una política de conservación y rehabilitación adecuada, para garantizar el correcto funcionamiento de la red, utilizando los recursos de la mejor manera posible, a continuación se describirán brevemente, las técnicas de conservación y rehabilitación utilizadas en España poniendo especial cuidado en el reciclado de pavimentos asfálticos ya que es el tema central de este trabajo.

2.4. Conservación y Rehabilitación de firmes asfálticos

El objetivo fundamental de los firmes de carreteras es prestar a los usuarios un servicio de calidad que satisfaga sus necesidades de movilidad. Para ello, una vez creada la infraestructura, hay que realizar una serie de actividades de conservación que cumplan con dos objetivos generales. El primero de ellos se dirige a asegurar una circulación segura, fluida y cómoda, de manera que los costes globales de transporte sean lo menores posible, y el segundo trata de la preservación del valor patrimonial de las carreteras, que forman parte de la riqueza de un país.

Un aspecto muy importante que se debe tener en cuenta es que el proyecto, la construcción y la conservación de una carretera están en estrecha relación. Una carretera proyectada y construida adecuadamente para el tráfico que va a soportar tendrá probablemente unos gastos de conservación menores. Por el contrario, una carretera proyectada y construida con un coste reducido puede llevar a gastos de conservación excesivos e incluso prohibitivos (Kraemer et al. 1999).

En la tabla 2.4.1 se muestran los costes medios anuales de conservación por kilómetro y año que la Dirección General de Carreteras considera dependiendo del tipo de carretera del que se trate.

Tabla 2.4.1 Costes medios de conservación por kilómetro y año (Fuente: Ministerio de Fomento <www.mfom.es>)

Tipo de carretera	Miles de euros por kilómetro y año
Media autovías y autopistas libres	19.83
Autovías urbanas (Madrid, Barcelona y Valencia)	39.6
Autovías con elevado tráfico	18.63
Carreteras convencionales	7.21

Las actuaciones de conservación y rehabilitación de los firmes y pavimentos se dirigen a tres objetivos particulares:

- Mantener una adecuada resistencia al deslizamiento de la superficie del pavimento que proporcione una seguridad suficiente a los vehículos.
- Conservar una regularidad superficial acorde con el trazado de la vía y con las velocidades normales de recorrido, de manera que la rodadura sea cómoda para el usuario.
- Asegurar una resistencia estructural suficiente para el tráfico que ha de soportar la carretera.

Dentro de las tareas de conservación pueden distinguirse diferentes niveles. En primer lugar, se sitúa la conservación propiamente dicha, en la cual las actuaciones no conducen a modificaciones sustanciales de los elementos de la carretera. Dentro de esta conservación se realizan actuaciones periódicas que impiden la aparición de deterioros (conservación preventiva) o bien se actúa lo antes posible cuando esos deterioros han aparecido (conservación curativa). A su vez, la conservación curativa puede dirigirse a la reparación de deterioros localizados (operaciones localizadas) o al tratamiento de tramos de una longitud apreciable (operaciones generales).

Algunas de las actuaciones ordinarias de conservación que se llevan a cabo con más frecuencia en los firmes asfálticos son las siguientes:

- Bacheos
- Saneamiento de blandones
- Reparación de mordientes (bordes)
- Sellado de grietas y juntas
- Fresados localizados
- Limpieza de pavimentos drenantes
- Eliminación de exudaciones

En un segundo nivel de la conservación se sitúan las rehabilitaciones. En general, se recurre a ellas cuando el paso del tráfico y las acciones climáticas han provocado una disminución apreciable de las características iniciales o cuando se quiere hacer frente a nuevas solicitudes no contempladas con anterioridad.

Las rehabilitaciones de un firme incluyen actuaciones de carácter extraordinario, a menudo de aplicación general, en un tramo de longitud apreciable y cuyo objetivo es un aumento significativo del índice de estado o de comportamiento de un firme. Puede referirse a las características superficiales, tratándose entonces de rehabilitaciones o renovaciones superficiales del pavimento, o a las características estructurales en las que nosotros nos centraremos.

Las rehabilitaciones estructurales se llevan a cabo habitualmente mediante un refuerzo o recrecimiento del firme. Es una técnica consistente en extender sobre el firme antiguo una o varias capas de materiales nuevos con espesor suficiente para producir un aumento significativo de la capacidad estructural.

En ocasiones, el mero recrecimiento presenta el inconveniente de que los deterioros de las capas antiguas son de tal magnitud que acaban reflejándose en superficie en poco tiempo, salvo que se recurra a espesores muy importantes de refuerzo. Por esa razón puede resultar conveniente fresar una o varias capas del firme, para a continuación reponer el espesor eliminado, antes de proceder a un recrecimiento que lógicamente será de menor espesor que si no se hubiera fresado. El fresado previo al recrecimiento tiene además la gran ventaja de poder rehabilitar de manera diferente zonas con distinto grado de deterioro, por ejemplo los distintos carriles de una misma calzada de una autopista.

Los materiales fresados pueden ser trasladados en primera instancia a un vertedero, pero eso crea una serie de problemas ambientales y además se desaprovechan unos materiales con un gran potencial de reutilización. Así surgen las técnicas de reciclado de firmes, cuyo objetivo es la rehabilitación aprovechando al máximo los materiales existentes, de manera que sea mínimo el espesor del recrecimiento final que pueda ser necesario para completar el proceso.

El reciclado es una técnica de rehabilitación que consiste en la reutilización de los materiales procedentes de los firmes que ya han estado en servicio: materiales deteriorados que han perdido en gran parte sus propiedades iniciales o materiales aún en condiciones de servir cuyas características se desea mejorar. Es una técnica relativamente antigua (más de ochenta años) que en los últimos años ha experimentado un fuerte impulso. El reciclado de los pavimentos asfálticos presenta una respuesta adecuada al reto que representan la creciente escasez de áridos y la dificultad cada vez mayor de enviar a un vertedero unos residuos que se pueden reutilizar. Entre 1990 y 1998 se han reciclado en España casi cinco millones de metros cuadrados de pavimento, casi en su totalidad usando la técnica de reciclado *in situ* en frío (Kraemer et al. 1999).

El reciclado se puede llevar a cabo *in situ* o trasladando los materiales levantados del firme a una central de fabricación. En ambos casos, se puede recurrir a técnicas en frío y en caliente.

Reciclado en frío *in situ*

En este caso la rehabilitación de los firmes existentes se logra mediante la ejecución de las siguientes operaciones a temperatura ambiente:

- Disgregación de sus capas superiores por fresado, con una eventual aportación de áridos.
- Adición a los materiales fresados, *in situ*, de conglomerantes hidráulicos o emulsiones bituminosas.
- Mezcla itinerante de los materiales mencionados, de modo que se obtenga una capa tratada que, después de compactada y tras un período de curado o maduración, presente una cohesión elevada.

En la tabla 2.4.2 se muestra una clasificación de los diferentes tipos de reciclados *in situ* en frío que se suelen utilizar en España.

Tabla 2.4.2 Clasificación de los reciclados *in situ* en frío (Fuente: Kraemer et al. 1999)

Ligante o conglomerante	Emulsión Bituminosa			Cemento
Clase	I	II	III	IV
Dosificación	4-7%	3-5%	2-4%	3-6%
Firme que se recicla	Pavimento bituminoso (< 5 cm) + base granular	Pavimento bituminoso (< 10 cm) + base tratada o no	Mezclas bituminosas	Firmes degradados
Espesor reciclado	8-15	8-15	5-15	20-35
Objetivos	Estabilización y regularización del firme		Regeneración del ligante	Formación <i>in situ</i> de una base tratada

El reciclado *in situ* en frío se puede llevar a cabo en principio con equipos muy diversos. Para cada una de las fases del proceso hay una o varias máquinas de uso múltiple a las que cabe recurrir. Sin embargo, cada vez se emplean más unos equipos específicos, mejor adaptados, que realizan el fresado, la adición del agua y de los ligantes o conglomerantes necesarios, la mezcla y el extendido en una sola pasada.

Con estos reciclados se reducen al mínimo el ruido y la contaminación atmosférica, pues los tres primeros procesos tienen lugar en las cámaras de fresado y de mezcla. Se trata, en suma, de unas máquinas fresadoras-mezcladoras-extendedoras, que requieren de una potencia elevada, pero que permiten reciclar unos espesores importantes con grandes rendimientos y con una buena regularidad superficial.

Al estudiar la viabilidad de un reciclado *in situ* en frío hay que decidir si se realizará con emulsión bituminosa o con cemento. Las principales diferencias son las siguientes:

- El espesor de un reciclado *in situ* con una emulsión bituminosa es notablemente menor que el del reciclado con cemento; si se recicla con una emulsión bituminosa el menor espesor de reciclado se sitúa en el entorno de los 5-8 cm, mientras que el mayor es de 15 cm. Por el contrario, en los reciclados con cemento los espesores de reciclado varían entre 20 y 35 cm.

- La función de un reciclado con emulsión bituminosa es la de aprovechar en la mayor medida de lo posible el firme antiguo y, en particular, el ligante bituminoso que pudiera existir en él; no hay un cambio radical en las características estructurales de los diferentes materiales. En cambio, con un reciclado con cemento se obtiene un soporte de cierta rigidez, con distinto comportamiento estructural que los materiales antiguos, sobre el cual se van a extender unas capas de mezcla bituminosa para constituir un firme semirrígido.
- El reciclado con cemento no solo permite, en caso necesario, el ensanche de la plataforma, sino también obtener una capacidad de soporte transversalmente más homogénea si la plataforma había sido ya ensanchada con anterioridad.

Reciclado en caliente *in situ*

Dentro del reciclado *in situ* en caliente se pueden distinguir tres procesos, denominados respectivamente termorreperfilado (sin materiales de aportación), termorregeneración (con una cierta cantidad de materiales de aportación) y remezclado (con aportación de mezcla bituminosa nueva que se mezcla con el preexistente). Los dos primeros sólo sirven para renovaciones superficiales, mientras que el remezclado sirve para rehabilitaciones estructurales. En los tres casos se utilizan grandes máquinas integrales que en una sola pasada realizan de manera secuencial distintas operaciones: calentamiento del pavimento, levantamiento de un cierto espesor, formación de un cordón de material levantado, separación en su caso del material que no se vaya a reutilizar, eventual aportación de materiales nuevos, mezcla homogénea de los materiales nuevos con los antiguos, extensión y precompactación.

Estos procesos son complejos en sí mismos y la maquinaria muy costosa y, por su tamaño, sólo utilizable en autopistas. El calentamiento previo del pavimento produce una oxidación adicional del ligante, por lo que se dificulta aún más la efectividad del reciclado. Finalmente la eficacia de estas técnicas es limitada, pues sólo se puede actuar sobre los 4-6 cm superiores (Kraemer et al. 1999).



Fig. 2.4.1 Tren de reciclado en caliente in situ (Fuente: Martec Recycling Corporation <www.martec.ca>)

Reciclado en caliente en planta

De forma resumida se puede decir que éste procedimiento consiste en el levantamiento de la capa del pavimento que se va a reciclar, por medio del fresado o demolición , y su posterior traslado a una central de fabricación de mezclas bituminosas, donde tras un eventual machaqueo secundario y una clasificación granulométrica se mezcla en caliente con áridos y ligantes nuevos, así como agentes rejuvenecedores en caso necesario. El producto se destina generalmente para capas inferiores y arcenes, aunque en ocasiones también para capa de rodadura. En el siguiente capítulo se describe detalladamente éste procedimiento, ya que es el tema central del presente trabajo.