

2

Diseño de firmes y pavimentos asfálticos

El firme de una carretera, o de una calle, está constituido por un conjunto de capas colocadas horizontalmente sobre el terreno, siendo su función: proporcionar en todo tiempo una superficie cómoda y segura para la circulación de los vehículos, y transmitir las solicitaciones del tráfico suficientemente amortiguadas a la explanada, para que puedan ser soportadas por ésta.

En el diseño y proyecto de un firme de carreteras tenemos que tener en cuenta, por tanto, dos aspectos fundamentales. Por una parte, su función resistente, que nos determinará los materiales y los espesores de las capas que habremos de emplear en su construcción, y, por otra parte, su función y finalidad, que nos definirá las condiciones de textura y acabado que debemos exigir a las capas superiores del firme para que éstas resulten seguras y confortables. A estas capas superiores del firme se les denomina pavimento, y a veces existe la costumbre, sobre todo cuando nos referimos a calles o arterias urbanas, de llamar pavimento a todo el conjunto de las capas del firme.

El fallo de un firme se produce precisamente cuando la calidad de rodadura descende por debajo de unos umbrales, en que la conducción de los vehículos no se puede hacer de forma segura ni confortable.

El deterioro del firme se inicia cuando la carretera se pone en servicio y empiezan a circular los vehículos. Este deterioro se ve afectado por la acción de los factores y agentes climatológicos (lluvia, hielo, aire, sol, etc.) que incluso sin tráfico pueden deteriorar el firme y que potencian la acción del tráfico.

Para proceder correctamente al diseño y dimensionamiento estructural de un firme hemos de tener presente sus aspectos funcionales, porque serán éstos los que habremos de conseguir en su dimensionamiento, utilizando adecuadamente materiales, espesores y acabados y los que hemos de mantener, mediante las oportunas técnicas de conservación y rehabilitación, durante toda su vida de servicio. Ahora bien, el comportamiento estructural del firme y su resistencia al proceso de deterioro depende de los materiales que lo componen y de su modo y mecanismos de deterioro. Los métodos de dimensionamiento de firmes estudian y analizan los mecanismos de fallo y determinan los materiales y espesores adecuados para evitar que estos fallos ocurran en el tiempo considerado en su proyecto.

La vida de servicio de un firme suele ser mucho mayor que la considerada en su proyecto y mediante las sucesivas actuaciones de conservación y refuerzo, especialmente con estos últimos, vamos alargando la vida del firme y reparando sus posibles fallos.

2.1. COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL. TIPOS DE FIRMES Y MODOS DE DETERIORO

El firme de una carretera puede estar compuesto por materiales muy diferentes, que se pueden agrupar por su comportamiento y respuesta en cuatro tipologías de firme:

- firmes flexibles (base granular)
- firmes semiflexibles (base bituminosa)
- firmes semirrígidos (base tratada con ligantes hidráulicos)
- firmes rígidos (pavimento de hormigón)

Cada uno de estos tipos de firme tiene unas propiedades funcionales y un comportamiento ante los agentes de deterioro distintos. Es precisamente este comportamiento el que hemos de tener en cuenta tanto en su diseño (estructural y funcional) como en su mantenimiento y rehabilitación.

Firme flexible. (base granular)

Estos firmes se caracterizan por estar constituidas sus capas de base y de subbase por un material granular y estar recubiertos por un tratamiento superficial o una capa de mezcla bituminosa de espesor inferior a 15 cm.

En este tipo de firme son las capas granulares las que deben resistir fundamentalmente las acciones del tráfico. La capa de rodadura sirve para impermeabilizar el firme, soportar los efectos abrasivos del tráfico y proporcionar una capa de rodadura cómoda y segura.

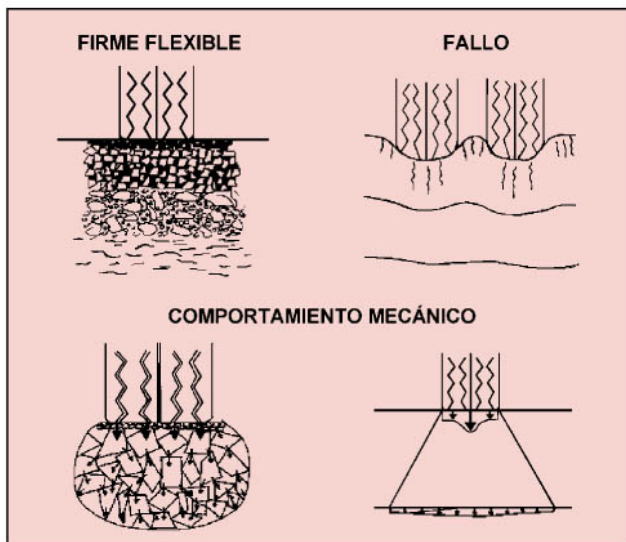
Las capas granulares deben soportar las fuertes solicitaciones normales del tráfico y transmitir las a la explanada suficientemente amortiguadas para que puedan ser soportadas por ésta. Estas capas trabajan por rozamiento interno de su esqueleto mineral y en su comportamiento es muy importante la resistencia al desgaste y a la atrición de los áridos que la componen. Cuando se emplean áridos poco resistentes se producen muchos finos y con ello aumenta la deformabilidad de la capa.

Por otra parte, es conveniente que las capas inferiores del firme sean lo más permeables posible con objeto de dar fácil salida al agua infiltrada. Son firmes cuyas capas granulares se caracterizan de abajo a arriba por una capacidad soporte creciente y una permeabilidad decreciente.

El modo de producirse el fallo en este tipo de firmes es por deformaciones excesivas. Como consecuencia de las sucesivas aplicaciones de cargas el

firme va deformándose principalmente en la zona de rodadura, hasta alcanzar unos límites intolerables.

También puede producirse el fallo estructural de este firme por fisuración por fatiga de su capa de rodadura, caso, por ejemplo, que ésta tenga cierto espesor, 4-8 cm, trabaje a flexotracción y las capas granulares resulten excesivamente flexibles y elásticas. En este caso la repetición de cargas acabará produciendo por fatiga la fisuración en malla fina de la capa de rodadura al mismo tiempo que aparecerán baches y fisuras longitudinales en los bordes del pavimento.



Firmes flexibles (base granular).

Aparte de estos deterioros que indican un fallo estructural, en este tipo de firmes se manifiestan también otros fallos, localizados en su superficie, que pueden repercutir negativamente sobre la capacidad del servicio prestado por el firme a los usuarios. Estos fallos son los siguientes:

- Pérdida de la microtextura (pulimento árido grueso).
- Pérdida de la macrotextura (incrustación de gravillas, exudaciones).

- Peladuras, descarnaduras.
- Desprendimientos de áridos.
- Deformaciones en la capa de rodadura (roderas, ondulaciones, arrollamientos).
- Baches.
- Fisuras (juntas, transversales, parabólicas, erráticas...).

Estos fallos son debidos principalmente a la acción abrasiva del tráfico y a la acción destructiva y de envejecimiento de los agentes atmosféricos, aunque a veces pueden también ser debidos al empleo de materiales inadecuados o a una mala ejecución.

Por último, indicar los blandones o hundimientos que son fallos localizados y que normalmente están unidos a una falta de drenaje o rotura del mismo o a una degradación o contaminación de las capas inferiores.

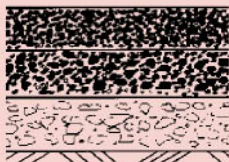
Firme semiflexible. (base bituminosa)

Este tipo de firmes empleados en nuestro país y también en otros países de Europa y de América del Norte como firmes de autopistas y carreteras principales, está compuesto por capas de mezclas bituminosas con un espesor total, igual o superior a 15 cm. sobre capas granulares no tratadas.

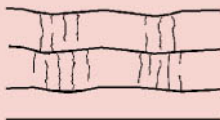
En este tipo de firme la capa de base trabaja a flexotracción, con una cierta rigidez, disminuyendo notablemente las sollicitaciones que llegan a la explanada, o bien, puede comportarse como un material más flexible, transmitiendo en una mayor proporción las tensiones a la explanada.

En el primer caso el fallo estructural del firme es por fisuración de sus capas bituminosas (base y pavimento) por fatiga (piel de cocodrilo), mientras que en el segundo caso el fallo sería por deformaciones excesivas, al igual que ocurre con los firmes de base granular.

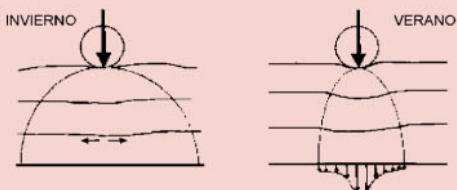
FIRME FLEXIBLE BASE BITUMINOSA



FALLO



COMPORTAMIENTO MECÁNICO



Firmes flexibles (base bituminosa).

Debido a las características particulares de las capas asfálticas, y a su susceptibilidad térmica, en el dimensionamiento de estos firmes y en el análisis de su comportamiento habrá que tener en cuenta ambos modos de deterioro, ya que ambos pueden presentarse conjuntamente en la práctica.

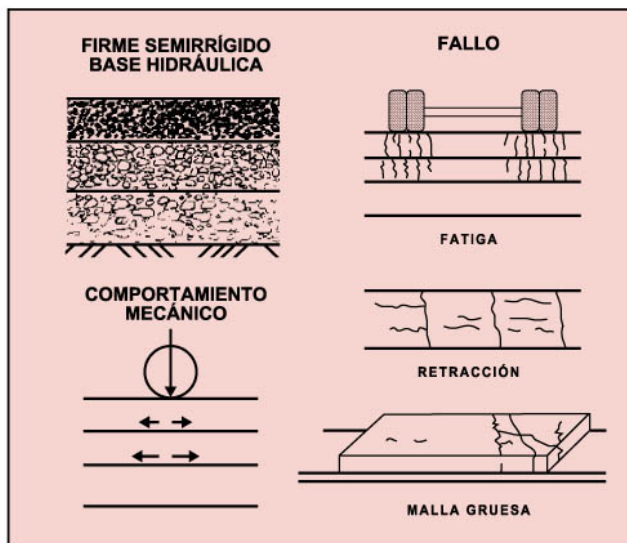
Otro modo de deterioro que habrá que considerar en este tipo de firmes es su fisuración por retracción térmica. Aunque éste no es el caso de nuestro país, en climas muy fríos hay que estudiar este tipo de fallo en función de su retracción térmica y la resistencia a tracción de la mezcla bituminosa.

También puede producirse el fallo de este tipo de firme por fisuración en malla gruesa. Este tipo de fallo está asociado a un infradimensionamiento de las capas de mezcla bituminosa o a una falta de adherencia entre éstas y las capas granulares. En ambos casos las tensiones a las que está sometida la capa de mezcla bituminosa son muy fuertes lo que conduce rápidamente a su fisuración en mallas largas.

Respecto a los fallos que aparecen en superficie son los mismos que en el caso anterior y vienen motivados también por los mismos factores: tráfico, agentes atmosféricos, materiales inadecuados y mala ejecución.

Firmes semirrígidos. (bases tratadas)

El firme semirrígido se diferencia de los otros dos tipos de firmes considerados, firmes flexibles, por una mayor rigidez de las capas que lo componen, en particular de su capa de base. Esta capa está formada por una base granular tratada con un ligante hidráulico o puzolánico. El pavimento está constituido por una o dos capas de mezcla bituminosa (rodadura e intermedia) y la subbase suele ser un material granular la mayoría de las veces estabilizado. En este tipo de firmes es fundamentalmente la capa de base, la que debido a su mayor rigidez, absorbe la mayor parte de los esfuerzos verticales, que llegan a la explanada muy amortiguados. El mecanismo de deterioro que produce su fallo es precisamente los esfuerzos de flexotracción a que está sometida la capa de base y que con el tiempo, debido a un proceso de fatiga, produce su fisuración. El fallo se manifiesta con la aparición en superficie de fisuras que evolucionan a una fisuración en malla fina. Cabe destacar de este tipo de firme que pequeñas variaciones en el espesor de la capa de base arrastran fuertes variaciones en la vida del firme.



Firmes semirrígidos (base tratada o hidráulica).

Otro tipo de fallo estructural que suele producirse en este tipo de firme es la fisuración en malla gruesa de la capa de rodadura con surgencia de lechada. Este tipo de fallo está asociado a una falta de cohesión del material tratado. Cuando el material de la capa de base es de mala calidad o ha sido puesto en obra defectuosamente no adquiere la suficiente cohesión y se comporta como un material granular. Esto se traduce en un aumento de las tensiones a que están sometidas las capas de mezcla bituminosa que rápidamente se fisuran.

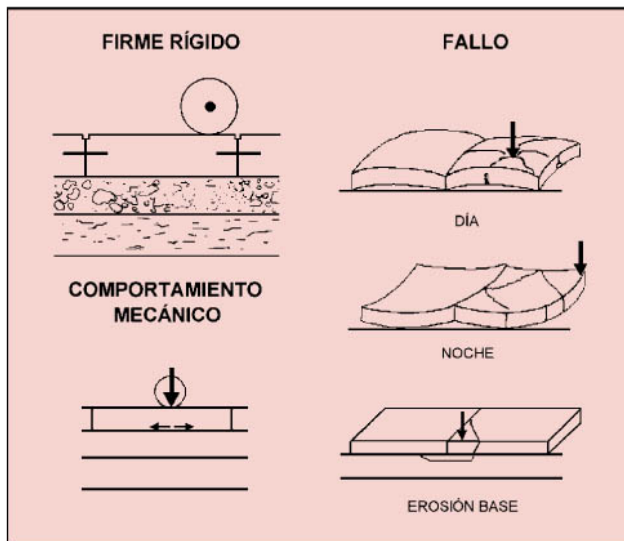
La pérdida de adherencia de las capas de mezcla bituminosa respecto a la base tratada puede ser también causa de deterioro y ruina del firme con la aparición de baches, fisuras, desprendimientos, etc. Este fallo puede estar asociado al empleo de un espesor insuficiente en las capas de pavimento; a no haber conseguido una buena adherencia base-pavimento durante la ejecución de este, o bien, al empleo de pavimentos permeables que faciliten el acceso del agua a la zona de contacto base-pavimento.

En su deterioro superficial aparecen los mismos fallos que en los dos casos anteriores, aunque en este tipo de firmes hay que señalar la aparición con gran profusión de fisuras transversales en la capa de rodadura. Estas fisuras que pueden aparecer cada 3-4 m, proceden de las grietas de retracción, que de la capa de base se propagan al pavimento.

Firmes rígidos. (pavimentos de hormigón)

Un pavimento de hormigón está constituido por una losa de hormigón que puede ser colocada directamente sobre la explanada o bien intercalando una capa soporte que puede o no estar tratada. En este firme la losa de hormigón actúa al mismo tiempo como capa de rodadura y como capa de base. La capa soporte no tiene un fin estructural sino el de proporcionar una superficie de apoyo adecuada a la losa de hormigón y facilitar la construcción de ésta. Dentro de los pavimentos de hormigón se distinguen:

- Los pavimentos de hormigón de losas cortas, 3-5 m, en hormigón en masa y juntas con o sin pasadores.
- Los pavimentos de hormigón de losas largas de hormigón armado y juntas con pasadores.
- Los pavimentos de hormigón armado continuos.
- Los pavimentos de hormigón pretensado.



Firmes rígidos.

El fallo estructural de este firme es por fisuración por fatiga. Sin embargo, no es éste su fallo más frecuente, sino que éstos suelen ser superficiales, afectando fundamentalmente la calidad de rodadura del firme. Estos defectos provienen del estado de las juntas, del estado de la superficie de la losa y de la situación relativa entre losas (escalonamiento).

- En las juntas se detecta el desprendimiento del producto de sellado, el envejecimiento del mismo, lo que lo vuelve frágil y degradable y también el desconchado de la junta.
- En la losa se aprecian peladuras, desconchados y pérdidas de árido grueso, consecuencia de la acción abrasiva del tráfico y de la intemperie o bien como resultado del empleo de materiales de baja calidad.

También pueden aparecer en la losa fisuras de retracción si se retrasa el serrado de las juntas y fisuras en las esquinas debido a una falta de apoyo o sobrecarga de la misma.

Por último, el escalonamiento entre losas o marcha en escalera es debido a una degradación de las condiciones de apoyo de la losa, lo que provoca un basculamiento de la misma.

Es posible asimismo que se produzca el combado de las losas y el pandeo de las mismas como consecuencia de los esfuerzos térmicos.

La mayor parte de estos defectos no existen en los pavimentos de hormigón armado continuos, salvo que sean debidos a una mala ejecución.

2.2. CONSIDERACIONES FUNCIONALES

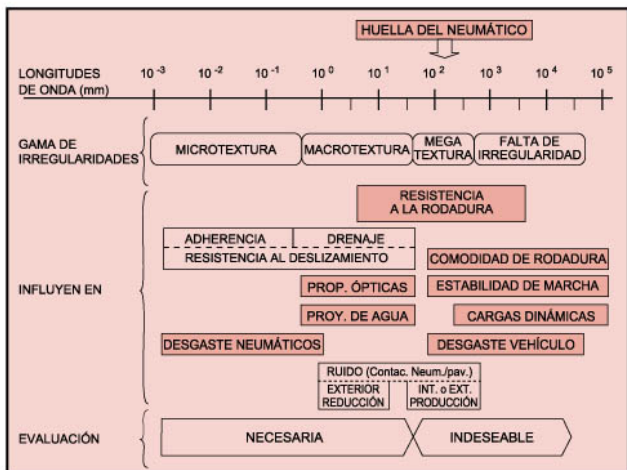
Las características o cualidades funcionales del firme residen fundamentalmente en su superficie. De su acabado y de los materiales que se hayan empleado en su construcción dependen aspectos tan interesantes y preocupantes para los usuarios, como:

- 1.- La adherencia del neumático al firme.
- 2.- Las proyecciones de agua en tiempo de lluvia.
- 3.- El desgaste de los neumáticos.
- 4.- El ruido en el exterior y en el interior del vehículo.
- 5.- La comodidad y estabilidad en marcha.
- 6.- Las cargas dinámicas del tráfico.
- 7.- La resistencia a la rodadura (consumo de carburante).
- 8.- El envejecimiento de los vehículos.
- 9.- Las propiedades ópticas.

Estos aspectos funcionales del firme están principalmente asociados con la textura y regularidad superficial del pavimento. En la tabla adjunta puede observarse la incidencia de cada uno de estos factores sobre las cualidades del firme. Dentro de la textura se suele distinguir entre la microtextura, que son las irregularidades superficiales del pavimento menores de 0,5 mm, la macrotextura, que son las de 0,5 a 50 mm, y la megatextura, irregularidades de 50 a 500 mm. La primera sirve para definir la aspereza del pavimento, la segunda su rugosidad y la tercera está más asociada con los baches o peladuras que puede haber en el firme. Por otra parte, la irregularidad superficial está asociada con ondulaciones de longitudes de onda mayores de 0,5 m.

Como puede observarse en dicha tabla, la microtextura, la aspereza del pavimento, es necesaria para conseguir una buena adherencia. La macrotextura es necesaria para mantener esa adherencia a altas velocidades o con el pavimento mojado. La macrotextura mejora también la visibilidad

con pavimento mojado, elimina o reduce los fenómenos de reflexión de la luz, que tienen lugar en los pavimentos lisos mojados, y mejora la percepción de las marcas viales.



Efecto de las características superficiales sobre las cualidades funcionales de los firmes.

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

2.2.1. Especificaciones sobre características funcionales.

Las especificaciones sobre regularidad son dadas por el Pliego General de Carreteras (PG-3) para cada unidad de obra. Se recogen en esta tabla las diferentes especificaciones, con objeto de tener una visión global de la regularidad de las distintas capas del firme.

Regularidad para las capas de firmes. Rangos de IRI y porcentajes máximos admitidos.

IRI (dm/mm) - NLT-330		1,5	1,8	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
Zahorras Art. 510, PG - 3	$e_{\text{esz}} \geq 20$ cm					50		80		100
	$20 \text{ cm} > e_{\text{esz}} > 10$ cm				50		80		100	
	$e_{\text{esz}} < 10$ cm				50		80	100		
Materiales tratados con cemento Art. 513, PG - 3	T00 a T2 (1 ^{er} a capa bajo mezcla)				50	80	100			
	T00 a T2 (2 ^{da} capa bajo mezcla)					50	80	100		
	T3, T4 y arcenes					50	80	100		
	Rodadura e Intermedia (A)	50	80	100						
Mezclas bituminosas tipo AC, y PA Art. 542, PG - 3	Nueva construcción					100				
	Rodadura e Intermedia (RV)	50		80	100					
	Resto de capas			50	80	100				
	Espesor recrecimiento > 10 cm (A)	50	80	100						
	Espesor recrecimiento > 10 cm (RV)	50		80	100					
Rehabilitación	Espesor recrecimiento < 10 cm (A)	50		80	100					
	Espesor recrecimiento < 10 cm (RV)	50			80	100				
	Autopistas y autopistas (A)	50	80	100						
	Resto de vías (RV)	50		80	100					
	Espesor recrecimiento > 10 cm (A)	50	80	100						
Mezclas bituminosas BBTM A y B Art. 543, PG - 3	Nueva construcción									
	Rodadura e Intermedia (RV)	50		80	100					
	Espesor recrecimiento > 10 cm (A)	50	80	100						
	Espesor recrecimiento > 10 cm (RV)	50		80	100					
	Espesor recrecimiento < 10 cm (A)	50		80	100					
Rehabilitación										
Espesor recrecimiento < 10 cm (RV)	50		80	100						
Espesor recrecimiento < 10 cm (RV)	50			80	100					

(A): Autopistas y autopistas

(RV): Resto de vías

esz: espesor de capa sobre zahorra

Textura y adherencia.

Se indican en la siguiente tabla los valores mínimos de profundidad de mancha de arena y coeficiente de rozamiento transversal, según el tipo de mezcla (Art. 542 y 543, PG-3).

Textura y adherencia de capas de rodadura bituminosas.

Tipo de mezcla	PA	BBTM B	BBTM A	Resto
Profundidad mínima mancha de arena (mm) - NLT-335	1,5	1,5	1,1	0,7
Coefficiente mínimo rozamiento transversal (%) - NLT-336	60	60	65	65