

## LAS CARRETERAS Y SUS FIRMES

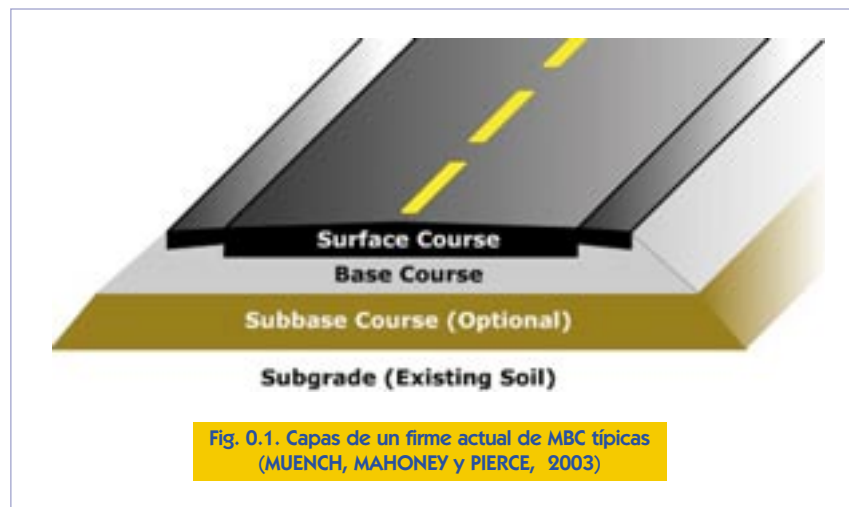
Dada la cálida acogida por parte de mis compañeros, del artículo “Vías, carreteras y otras calzadas: Breve historia de las mismas”, me he decidido a continuar esta pequeña serie de artículos sobre las carreteras. De este modo, una vez visto de forma sucinta el desarrollo de las carreteras y su devenir a lo largo del tiempo, estamos en disposición de concluir que una carretera es una estructura resistente con unas características geométricas adecuadas.

Rubén Tino Ramos, Ingeniero de Materiales, Ingeniero Técnico de Obras Públicas y Técnico Superior de Prevención de Riesgos Laborales (Jefe de Sección de la Unidad de Carreteras de Zamora del Ministerio de Fomento)

### Concepto de carretera y concepto de firme

Pero una carretera es mucho más que todo esto, así, según la vigente ley 25/1988, de 29 de julio, de Carreteras, (JEFATURA DEL ESTADO, 1988) se consideran carreteras las “vías de dominio y uso público proyectadas y construidas fundamentalmente para la circulación de vehículos automóviles”. Una carretera está constituida por numerosos elementos tales como firme, señalización, drenaje, obras de paso, puentes, viaductos, túneles, ornamentación, etc, y su destino es la unión de los diferentes territorios y ciudades entre sí para permitir la movilidad de personas y productos entre ellos, favoreciendo sus relaciones, desarrollando el comercio, la industria, el turismo, etc.

La importancia de las carreteras es muy alta, así como ejemplo, según datos del MINISTERIO DE FOMENTO (2005), la red de carreteras españolas tiene una longitud total de 329.429 kms., de los que 24.797 kms. son carreteras estatales y 71.502 pertenecen a las Comunidades Autónomas. El resto de la red está formado por 64.660 kms., mantenidos por los Consejos Provinciales e Insulares, y 168.470 kilómetros que pertenecen a los Ayuntamientos y a varias agencias gubernamentales como ICONA, el Ministro de Defensa, la Confederación Hidrográfica, etc. Las vías de doble carril (autopistas de peaje, sin peaje y autovías) suman 11.099 kms, de los cuales, 2.450 pertenecen a las redes de carreteras de las Comunidades Autónomas.



Los firmes de carreteras se proyectan con una calidad inicial, sabiendo que el paso de vehículos generará un deterioro hasta umbrales inadmisibles, por lo que será necesario un mantenimiento de la misma para evitar su ruina.

El firme se define según la norma española 6.1 IC (MINISTERIO DE FOMENTO, 2003a), como el conjunto de capas ejecutadas con materiales seleccionados y, generalmente, tratados, que constituye la superestructura de la plataforma, resiste las cargas del tráfico y permite que la circulación tenga lugar con seguridad y comodidad.

Un firme flexible está constituido por varias capas de distintos materiales. Cada capa recibe las cargas de la capa anterior, absorbiendo parte y pasando el resto de estas cargas a la capa inferior. Para aprovechar este

reparto de cargas, las capas materiales se colocan por lo general según la capacidad portante necesaria, es decir, las capas inferiores tendrán una capacidad portante menor que las superiores. Llamamos pavimento a la parte superior de un firme, que debe resistir los esfuerzos producidos por la circulación, proporcionando a ésta una superficie de rodadura cómoda y segura.

Como esquema general, (NAPA, 2001 y MINISTERIO DE FOMENTO 2003) podemos distinguir en un firme flexible las siguientes capas:

- Capa superficial o pavimento. Es la capa superior y la que entra en contacto con el tráfico. Puede estar compuesta de una o varias subcapas, todas ellas constituidas por Mezclas Bituminosas en Caliente (MBC). Se distinguen dos subcapas:



- **Capa de rodadura:** Capa superior o única de un pavimento de mezcla bituminosa.
- **Capa intermedia:** Capa de un pavimento de mezcla bituminosa situada debajo de la capa de rodadura.
- **Capa inferior o base.** Ésta es la capa que se encuentra directamente debajo de la capa de MBC y está constituida generalmente por áridos, con o sin cemento, aunque también puede estar constituida por mezcla bituminosa. Su misión es eminentemente estructural.
- **Capa de Subbase.** Ésta es la capa (o capas) que se encuentran por debajo de la capa de base. No siempre es necesaria. Su misión es contribuir a la resistencia estructural dada por la base, aunque también cumple otras misiones como evitar la contaminación del subsuelo del pavimento con materiales procedentes de la explanada, mejorar el drenaje, reducir los daños por heladas, así como proporcionar una plataforma para la construcción. Los materiales a utilizar son de baja calidad comparados con los de las capas superiores pero mejores que los del subsuelo.

La explanada es la superficie sobre la que se apoya el firme, no perteneciente a su estructura, y a la que se le exigen una serie de requisitos estructurales. Puede ser natural o estar mejorada mediante aporte de suelos de buena calidad o con técnicas de estabilización *in situ* de los mismos.

Como se ha visto, el firme se utiliza para evitar la acción directa de las cargas producidas por los vehículos de transporte sobre la explanada, ya que suelen ser de varias toneladas por rueda, con presiones de 0,6 a 1 MPa en los grandes vehículos de transporte de viajeros y mercancías, (KRAEMER *et al*, 2004) lo que produciría en poco tiempo importantes deformaciones. Por otra parte, los esfuerzos tangenciales superficiales que se producen en la capa más externa del firme, llamada capa de rodadura o simplemente rodadura, y el hecho de encontrarse la carretera a la intemperie, darían lugar a una superficie deslizante e inestable en tiempo lluvioso y polvoriento e irregular en tiempo seco. En suma, el camino sería incómodo y peligroso, con una necesidad de conservación relativamente frecuente y costosa; además, los vehículos tendrían que rodar a pequeña velocidad. Por todo ello, el firme tiene que cumplir las siguientes funciones:

- Proporcionar una superficie de rodadura segura, cómoda y de características permanentes bajo las repetidas cargas del tráfico a lo largo de un período de tiempo suficientemente largo.
- Resistir las solicitaciones del tráfico pesado repartiendo las presiones verticales ejercidas por las cargas, para que a la explanada sólo llegue una carga inferior a su capacidad de soporte, y las deformaciones producidas en ella y en las distintas capas del firme deben ser admisibles, teniendo en cuenta la repetición de las cargas y la resistencia a la fatiga de los distintos materiales.

- Proteger la explanada de la intemperie, en particular de la acción del agua y su incidencia en la disminución de la resistencia al esfuerzo cortante en suelos, así como la protección a los efectos de los ciclos de hielo y deshielo de la misma.

**Concepto de mezcla bituminosa**

Actualmente existe una gran variedad de firmes, que se clasifican en dos grandes grupos de acuerdo a los materiales que los componen y a la forma que tienen de distribuir los esfuerzos y deformaciones generados por el tráfico:

- **Firmes flexibles,** que están constituido por una serie de capas de materiales con resistencia a la deformación decreciente con la profundidad, de forma análoga a la disminución de tensiones transmitidas.
- **Firmes rígidos,** que tienen una capa de hormigón que asegura la función resistente. Por su mayor rigidez, distribuyen las cargas verticales sobre un área grande y con tensiones reducidas.

La actual normativa española 6.3 IC sobre rehabilitación de firmes (MINISTERIO DE FOMENTO 2003a) clasifica a su vez los firmes en:

- **Firmes flexibles,** que son los constituidos por capas granulares no tratadas y materiales bituminosos en un espesor inferior a 15 cm.

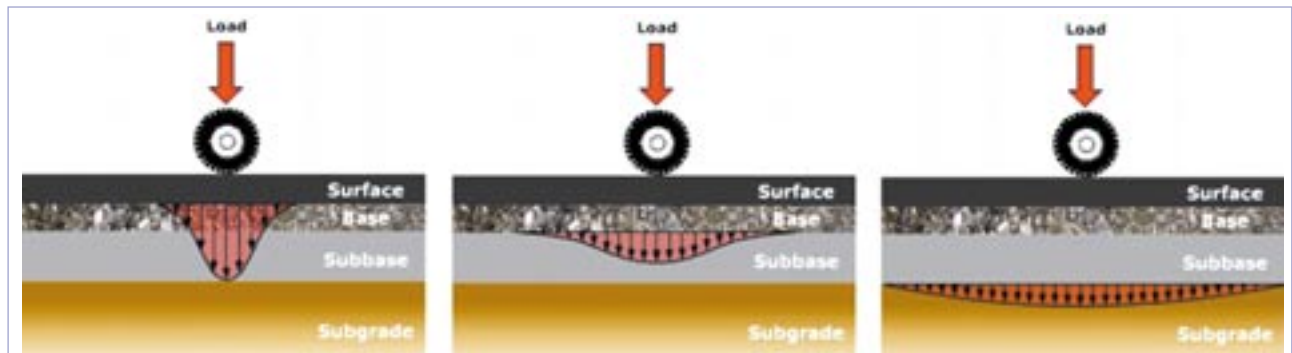


Fig. 0.2. Transmisión de carga entre capas del paquete de firmes (MUENCH, MAHONEY y PIERCE, 2003)

- **Firmes semiflexibles**, en los que el espesor de los materiales bituminosos sobre capas granulares no tratadas iguala o supera los 15 cm.
- **Firmes semirrígidos**, son los constituidos por materiales bituminosos en cualquier espesor sobre una o más capas tratadas con conglomerantes hidráulicos o puzolánicos, siendo el espesor conjunto de éstas igual o superior a 18 cm y con un comportamiento que garantice todavía una contribución significativa a la resistencia estructural del conjunto del firme.

• **Firmes rígidos**: Son los constituidos por pavimento de hormigón, generalmente losas, (existe también el pavimento continuo de hormigón), que se pueden colocar directamente sobre la explanada o bien sobre un capa soporte que puede estar o no, tratada.

• **Otros tipos de firmes**: Existen otros firmes constituidos a base de adoquines, losas, aceras, etc.

La mayor parte de los firmes están constituidos, en sus capas superiores, por

materiales compuestos bituminosos, por lo que el presente estudio se centrará en ellos.

Las mezclas bituminosas se pueden clasificar de diversas formas, así, según KRAEMER *et al* (2004) podemos distinguir:

a) por la **temperatura** de puesta en obra:

- Mezclas en caliente, que se fabrican con betunes asfálticos a temperaturas más o menos elevadas, en general, en torno a los 150 °C.

- Mezclas en frío, en las que el ligante suele ser una emulsión bituminosa y la puesta en obra se realiza a temperatura ambiente.

b) por el **porcentaje de huecos** de la mezcla:

- Densas (2 - 6 %) (D-12, D-20), siendo 12 y 20 los tamaños máximos nominales.

- Semidensas (6 - 12 %) (S-12, S-20, S-25).

- Gruesas (> 12%) (G-20, G-25).

- Drenantes (> 20%) (PA-12).

c) por el **tamaño** del árido:

- Mezclas gruesas (> 20 mm).

- Mezclas finas (10 ÷ 20 mm).

- Microaglomerados (< 10 mm).

d) por la **granulometría**:

- Mezclas continuas (curva continua).

- Mezclas discontinuas (curva discontinua).

e) por la **estructura del árido**:

- Sin esqueleto mineral (poco uso en España), la resistencia de estas mezclas es debida únicamente a la cohesión de la masilla o betún.

- Con esqueleto mineral, en las que la componente de la resistencia debida

**Total Production of Hot Mix Asphalt in 1999 - 2004  
(in million tonnes)**

Country	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Austria	6,5	5,9	9,5	10,0	10,0	10,0
Belgium	5,0	4,8	4,5	4,5	4,8	4,9
Croatia	1,7	1,7	1,8	1,9	3,5	3,0
Czech Republic	4,6	4,7	4,3	4,4	5,8	5,5
Denmark	3,3	3,3	2,8	2,8	2,9	3,6
Estonia	0,7	0,7	0,6	1,1	0,9	1,1
Finland	4,1	3,8	3,6	4,1	4,9	4,5
France	39,5	39,9	40,5	39,4	38,7	40,5
Germany	68,5	65,0	63,0	58,0	55,0	52,0
Greece	6,5	6,5	6,5	6,5*	6,5*	7,0
Hungary	2,4	2,5	2,9	3,2	3,1	3,0
Iceland	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,3
Ireland	2,6	2,9	3,1	3,2	3,3	3,4
Italy	41,0	37,3	39,8	39,9	42,4	43,8
Latvia	0,7	0,6	0,6*	0,6*	0,6*	0,6*
Netherlands	8,4	7,5	7,7	7,9	7,9	7,9
Norway*	4,8	4,5	4,1	3,9	4,1	4,5
Poland	10,0	11,6	11,2	10,8	12,0	12,7
Portugal	7,7	5,6	5,5	6,0	0,6*	6,0*
Romania	1,7	2,8	2,5	2,8	2,8*	2,8*
Slovakia	2,0	1,1	1,1	1,2	1,2	1,0
Slovenia	1,8	1,8	1,4	1,4	1,6	1,7
Spain	25,7*	30,0	30,0*	30,0*	42,0	38,9
Sweden	7,3	7,2	6,7	6,7	6,6	6,8
Switzerland	5,1	5,2	5,1	5,0	4,8	4,6
Turkey	9,5	10,7	11,3	14,7	13,2	11,3
United Kingdom	26,0	25,5	26,5	27,8	27,8	26,9
<b>Europe</b>	<b>297,4</b>	<b>293,4</b>	<b>296,9</b>	<b>298,0</b>	<b>307,2</b>	<b>308,3</b>
Israel	5,3	5,1	5,6	6,2	6,1	
Australia	7,0	6,5	6,7	7,0	6,5	6,9
Japan	71,4	71,0	69,4	68,1	63,7	
Canada - Ontario	14,0	14,5	14,0	14,0	13,0	11,0
New Zealand	0,7*	0,7*	0,6		0,8	
U.S.A.	545,0	535,0	520,0	500,0	500,0	512,0
Venezuela						6,6

Tabla 2.1 Producción mundial de firme bituminoso. EAPA (2004)



al rozamiento interno de los áridos es notable.

f) por el **tipo de ligante** empleado:

- Convencionales (betunes normales).
- Especiales (betunes modificados).

Combinando estos criterios de clasificación, se obtiene diversos tipos de mezclas, siendo los más utilizados:

- Hormigones bituminosos en caliente (También llamadas mezclas bituminosas en caliente o Hot Mix Asphalt -HMA- en inglés): Son el tipo más generalizado. Se usan tanto en vías urbanas como en carreteras convencionales, autopistas y aeropuertos, y se utilizan tanto para capas de rodadura como para las capas inferiores. Se fabrican con betunes asfálticos normales o modificados, variando la proporción del ligante según la granulometría y el uso de la mezcla, de un 3% a un 6% sobre la masa del árido. Son siempre de granulometría continua, de forma que las partículas más finas rellenan los huecos que dejan las más gruesas, y todas ellas están recubiertas por una película continua de ligante. Hay que tener en cuenta en estas mezclas que son muy sensibles al contenido de ligante, de forma que una pequeña variación puede producir cambios importantes en su comportamiento reológico.
- Mezclas en frío: Están fabricadas con emulsiones bituminosas. Su principal campo de aplicación es la construcción y conservación de carreteras secundarias, ya que no garantizan una alta calidad para su uso en carreteras principales. Las más utilizadas son las de tipo abierto, formadas fundamentalmente por un árido grueso y una emulsión bituminosa, con una baja proporción de árido fino, lo que produce una elevada proporción de huecos, de forma que en ellas existe una estructura mineral que resiste fundamentalmente por rozamiento interno. Cuentan con una gran flexibilidad, por lo que se uti-

lizan para capas de pequeño espesor (hasta 5 cm), dispuestas sobre capas granulares con baja intensidad de tráfico. La proporción de betún asfáltico residual está en torno al 2,5 – 3% sobre la masa de árido. También existen las mezclas densas en frío, mucho menos utilizadas. Se fabrican con emulsiones de rotura lenta sin fluidificante (separación del betún y del agua por evaporación o por reacción química, formando el betún una película continua; no confundir con el curado de los betunes fluidificados) y no pueden abrirse a la circulación hasta que han alcanzado una resistencia suficiente. A este proceso de aumento paulatino de la resistencia se le llama maduración y consiste básicamente en la evaporación del agua procedente de la rotura de la emulsión con el consiguiente aumento de cohesión de la mezcla; este proceso es relativamente lento debido a la granulometría cerrada del árido que hace que la mezcla tenga una pequeña proporción de poros.

- Mezclas porosas o drenantes, que tienen una proporción muy elevada de huecos (20 al 30%) lo que les da gran permeabilidad, por lo que se usan en capas de rodadura de espesores de hasta 4 cm, con lo que se consigue que el agua de lluvia caída sobre la calzada se evacúe rápidamente por infiltración. La impermeabilización de las capas inferiores y del cimiento se consigue mediante la capa inmediatamente anterior. Para su confección se suelen utilizar betunes modificados por su mayor adhesividad, aunque también existe experiencia con betunes convencionales para tráfico de no excesiva intensidad. Los principales problemas son las heladas, que los disgregan, y la colmatación de sus poros a lo largo de su vida útil, lo que obliga a mayores gastos de conservación y mantenimiento.
- Microaglomerados, que son mezclas con un tamaño máximo de árido inferior a 10 mm, por lo que se suelen usar en capas de pequeño espesor, y no aportan características estructurales al firme, sino que sirven por lo general

para realizar tratamientos superficiales en operaciones de mantenimiento, impermeabilización y conservación.

- Mezclas sin esqueleto mineral; son las llamadas masillas y asfaltos fundidos en los que existe una elevada proporción de polvo mineral y de ligante, de forma que el árido grueso se encuentra disperso en la masilla que se forma, por lo que este tipo de mezclas no trabajan por rozamiento interno sino que su resistencia está dada por la cohesión que proporciona la viscosidad de la masilla. Se suelen utilizar en lugares donde es absolutamente necesaria la impermeabilidad de las capas, esto es, en países con clima frío y húmedo, tanto en tableros de puentes como en vías urbanas e incluso aceras.
- Mezclas de alto módulo; son también hormigones bituminosos en caliente pero con un elevado módulo de elasticidad (del orden de 13.000 MPa a 20 °C, mientras que las mezclas normales suelen tener un módulo del orden de 6.000 MPa a la misma temperatura), por lo que se suelen utilizar como capas de base. Se fabrican con betunes muy duros (penetración 10/20), tanto convencionales como modificados, y con una dotación de alrededor del 6% sobre la masa de áridos; la dotación de polvo mineral es alta también (8 al 10%). Su resistencia a fatiga también es elevada y se suelen utilizar en capas de gran espesor, de 8 a 15 cm.

### Materiales constituyentes

Las mezclas bituminosas o aglomerados asfálticos, son materiales compuestos que están formados por una combinación de áridos (refuerzo) y un ligante hidrocarbonado (matriz), de forma que las partículas áridas quedan cubiertas por una película continua de dicho ligante (también llamado betún).

#### La Matriz

La matriz de las mezclas bituminosas lo constituyen los ligantes hidrocarbonados, entre los que distinguimos los betu-

nes y los asfaltos. Su diferencia estriba tanto en su origen (los betunes provienen de la destilación del petróleo y los asfaltos provienen de la destilación del carbón hulla) como en si la solubilidad que presentan en tolueno es total (betunes) o no (asfaltos).

Actualmente, ha caído en desuso la utilización de asfaltos, extendiéndose por el contrario la del betún, por lo que nos centraremos en su descripción.

Podemos entonces definir el betún como un material orgánico, adherente e impermeabilizante, muy viscoso y casi sólido, no cristalino, prácticamente no volátil, y de color negro. Son semisólidos o sólidos a temperatura ambiente, y su manipulación requiere su calentamiento para reducir su consistencia a valores admisibles para la operación a realizar. Tienen además unas propiedades aglomerantes características.

Se obtiene como el residuo no volátil de la destilación del petróleo crudo o por separación como el refinado de un aceite residual en un proceso de descarbonización.

Los betunes son una mezcla de hidrocarburos como pueden ser los nafténicos, parafínicos y aromáticos, que tienen un peso molecular elevado, y una proporción relativamente grande de hidrocarburos con un número de carbonos en su mayor parte superior a C25 (alta relación de carbono oxígeno). Los principales componentes del betún son por tanto el carbono y el hidrógeno y, en mucha menor proporción, oxígeno, nitrógeno, azufre y metales pesados, como níquel y vanadio.

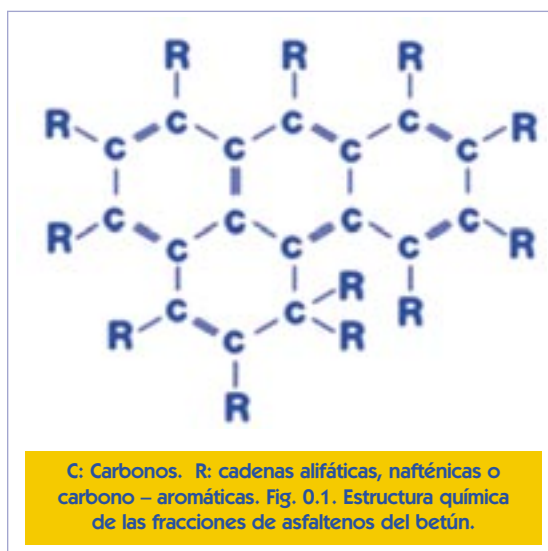
Desde el punto de vista de su naturaleza, son sistemas coloidales cuya fase discontinua o dispersa está formada por asfaltos y resinas asfálticas. (Los conjuntos de aceites y resinas se denominan maltenos).

Los betunes se suelen clasificar por su penetración según la norma NLT-124 (CEDEX 1992-2000), que no es otra cosa

que la distancia en décimas de milímetro, que penetra verticalmente una aguja normalizada en condiciones definidas de carga, tiempo y temperatura, siendo habitualmente estas condiciones 25°C, durante un tiempo de 5 s y con una carga móvil total, incluida la aguja, de 100 g.

Dentro de los betunes, asimismo debemos distinguir una serie de betunes especiales, a saber:

- Betún fluidificado: Derivado del betún obtenido por adición a éste de aceites o fluidificantes relativamente volátiles



(ligeros) provenientes de la destilación del petróleo, y teniendo por tanto una viscosidad reducida. El fluidificante, por tanto, no es más que un aditivo que se elimina posteriormente, durante el curado, por evaporación y que sirve principalmente para facilitar la puesta en obra, quedando al final solamente el betún primitivo.

- Betún fluxado: Derivado del betún obtenido por adición a éste de aceites relativamente no volátiles provenientes de la destilación del carbón (hulla).
- Betún modificado: Betún cuyas propiedades reológicas han sido modificadas durante su elaboración mediante el empleo de un agente químico, como por ejemplo el caucho natural, polímeros sintéticos, azufre, y ciertos com-

puestos organometálicos. Es necesario reseñar que al oxígeno y los catalizadores de oxidación, así como a las fibras y polvos inorgánicos no se les considera como agentes modificadores del betún. Los betunes modificados pueden ser empleados directamente o en forma fluidificada, de emulsiones, o como mezclas con asfalto natural.

Los ensayos más utilizados para identificar y comprobar el producto son:

- Penetración, definida en la norma NLT-124 (CEDEX 1992-2000) y ya explicada anteriormente.

- Índice de penetración, definido en la norma NLT-181 (CEDEX 1992-2000). Este índice se calcula a partir de los valores de penetración y de punto de reblandecimiento de anillo y bola y proporciona un criterio de medida sobre la susceptibilidad del betún a los cambios de temperatura y a su comportamiento reológico. (IP > 1 poca susceptibilidad a la temperatura y cierta elasticidad, IP < -1 mayor susceptibilidad a la temperatura y comportamiento más viscoso. IP entre 1y -1, características intermedias).

- Punto de reblandecimiento Anillo y Bola, definido en la norma NLT-125 (CEDEX 1992-2000), es la temperatura a la que un disco de betún se reblandece hasta permitir que una pequeña bola de acero, apoyada en su superficie, caiga a través de él. Es una medida de la temperatura a la que el betún tiene una fluidez determinada.

- Punto de fragilidad Fraass, definido en la norma NLT 182 (CEDEX 1992-2000), y consiste en someter a una película del material que recubre una placa de acero, a sucesivos ciclos de flexión a temperaturas decrecientes. El punto de fragilidad Fraass es la temperatura, en °C, en la que, a causa de la rigidez que va adquiriendo el material al enfriarse, se observa la primera fisura o rotura en la superficie de la película.



- Ductilidad, definido en la norma NLT 126 (CEDEX 1992-2000). El procedimiento consiste en someter a una probeta de material bituminoso a un ensayo de tracción, a una velocidad de 50 mm por minuto y a una temperatura de 25 °C, definiéndose la ductilidad como la distancia máxima a la que se estira la probeta hasta el instante de la rotura.
- Solubilidad en Tolueno, definido en la norma NLT 130 (CEDEX 1992-2000), que debe ser como mínimo de un 99,5%.
- Contenido en agua, definido en la norma NLT 123 (CEDEX 1992-2000). El método se basa en la destilación a reflujo de una muestra del material bituminoso, juntamente con un disolvente volátil no miscible con el agua, el cual, al evaporarse, facilita el arrastre del agua presente, separándose de ella al condensarse.
- Punto de inflamación, definido en la norma NLT 127 (CEDEX 1992-2000). El ensayo consiste en calentar de forma regulada un vaso con el material bituminoso, haciendo pasar periódicamente cerca de su superficie una pequeña

llama, hasta que se produce el primer destello de inflamación de los vapores.

- Densidad relativa, definido en la norma NLT 122 (CEDEX 1992-2000). Es la razón entre la masa de un determinado volumen de ligante y la masa de un volumen igual de agua a una determinada temperatura (25°C)

En el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes, PG3 (BUSTOS y PÉREZ 2004), en su artículo número 211, betunes asfálticos, se definen los límites que deben cumplir los betunes a utilizar para la fabricación de mezclas bituminosas.

*El refuerzo*

El refuerzo de las mezclas bituminosas lo constituyen los áridos, también llamado comúnmente esqueleto mineral. El árido es un término general que engloba a los materiales minerales tales como arenas, gravas y piedras procedentes del machaqueo que se utilizan para la fabricación de las mezclas bituminosas.

Dentro de los áridos distinguiremos tres tamaños: áridos gruesos (fracción de tama-

ño por encima de 2 mm), el árido fino (fracción de tamaño menor de 2 mm) y el filler o polvo mineral (fracción mineral menor de 63 mm).

En general, los áridos pueden ser naturales o artificiales. Los áridos naturales proceden del machaqueo, de formaciones rocosas que se suelen extraer a través de una excavación abierta (mina). La roca extraída se reduce a los tamaños adecuados por medio del machaqueo mecánico. Los áridos artificiales normalmente son subproductos de otras industrias tales como las escorias (subproducto del proceso metalúrgico - producido típicamente de procesar el acero, la lata y el cobre).

En cuanto a las rocas de las que provienen los áridos, según su origen geológico pueden ser (ROBERTS *et al.* 1996):

**Roca ígnea.** Son de tipo cristalino y se forman por el enfriamiento lento del material fundido de debajo de la corteza terrestre (magmas).

**Rocas sedimentarias.** Las rocas sedimentarias son las que se forman por acumulación de sedimentos, formando

Tabla 2.2. Valores límite de los betunes que forman una mezcla bituminosa. (BUSTOS y PÉREZ 2004).

Características	Unid.	Norma NLT	B 13/22		B 40/50		B 60/70		B 80/100		B 150/200		B 200/300	
			Mín.	Max.	Mín.	Max.	Mín.	Max.	Mín.	Max.	Mín.	Max.	Mín.	Max.
<b>Betún original</b>														
Penetración 25°C 100g 5s	0,1 mm	124	13	22	40	50	60	70	80	100	150	200	200	300
Índice de penetración		181	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1
Punto de reblandecimiento														
Anillo y Bola	°C	125	60	72	52	61	48	57	45	53	38	45	34	41
Punto de fragilidad Fraass	°C	182		+1		-5		-8		-10		-15		-20
Ductilidad_5cm/min A 15°C	cm		126										100	
Ductilidad_5cm/min A 25°C	cm	126	10		70		90		100		100			
Solubilidad en tolueno	%	130	99,5		99,5		99,5		99,5		99,5		99,5	
Contenido en agua (en vol.)	%	123	0,2		0,2		0,2		0,2		0,2		0,2	
Punto de inflamación	°C	127	235		235		235		235		220		175	
(*) Densidad relativa 25°C/25°C*		122	1,0		1,0		1,0		1,0		1,0		0,99	

capas o estratos que, sometidos a procesos físicos y químicos, se convierten en un material de cierta consistencia. Pueden formarse a las orillas de los ríos, en el fondo de barrancos, valles, lagos y mares, y en las desembocaduras de los ríos. Por su composición mineralógica se clasifican en arcillosas (arcilla, marga), calizas (creta, caliza), silíceas (arena, arenisca), orgánicas (carbón mineral), salinas (yeso, sal gema y otras sales precipitadas por el agua).

**Roca metamórfica.** Esta clase de rocas tiene su origen en el metamorfismo tanto de las rocas ígneas como de las sedimentarias. Es decir, que por acción del calor y/o de la presión cambian su estructura mineral convirtiéndose en rocas diferentes de la roca original.

La composición mineral del árido determina en gran parte sus características físicas así como el comportamiento de la mezcla bituminosa resultante, por lo que al elegir los áridos, es muy importante conocer las características mineralógicas de la roca de la mina de donde procede.

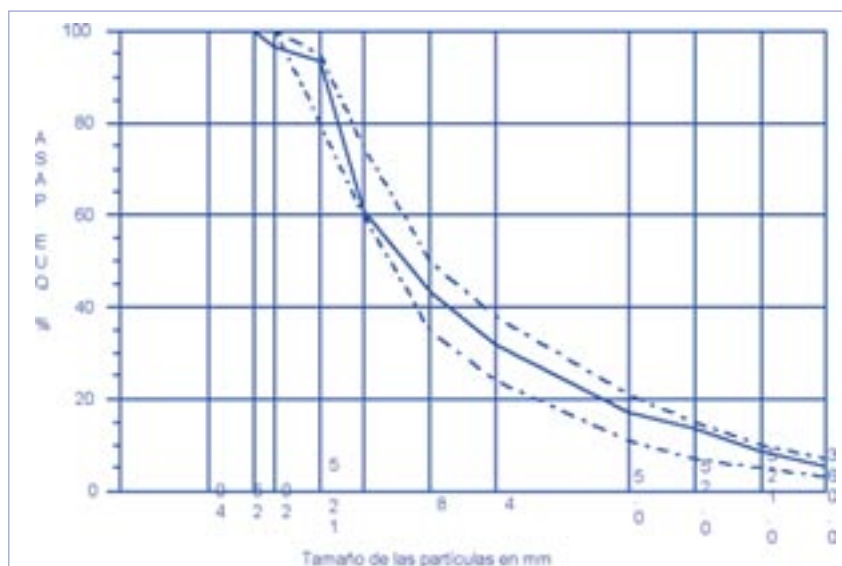


Fig. 0.2. Huso granulométrico para mezclas bituminosas tipo S-12

CORDON (1979) proporciona algunas pautas generales para el uso de áridos en las mezclas bituminosas en caliente.

Generalmente la relación entre las características mineralógicas de la mezcla y sus características físicas son

muy complejas, por lo que es muy difícil predecir con exactitud como se comportará basándose únicamente en las características mineralógicas.

Las características físicas de los áridos tienen un efecto directo sobre el comporta-

Tabla 2.3. Uso de áridos en mezclas bituminosas en caliente.

Tipo de la roca	Dureza	Resistencia a disgregarse <sup>1,2</sup>	Textura superficial	Forma machacada
<b>Ígneo</b>				
Granito	Suficiente	Suficiente	Suficiente	Suficiente
Sienita	Bueno	Suficiente	Suficiente	Suficiente
Diorita	Bueno	Suficiente	Suficiente	Bueno
Basalto	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno
Diaclasa	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno
Roca ígnea	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno
<b>Sedimentario</b>				
Piedra caliza	Pobre	Bueno	Bueno	Suficiente
Piedra arenisca	Suficiente	Bueno	Bueno	Bueno
Chert	Bueno	Suficiente	Pobre	Bueno
Pizarra	Pobre	Pobre	Suficiente	Suficiente
<b>Metamórfico</b>				
Gneis	Suficiente	Suficiente	Bueno	Bueno
Esquistos	Suficiente	Suficiente	Bueno	Suficiente
Pizarra	Bueno	Regular	Suficiente	Suficiente
Cuarcita	Bueno	Regular	Bueno	Bueno
Mármol	Pobre	Bueno	Suficiente	Suficiente
Serpentina	Bueno	Suficiente	Suficiente	Suficiente



miento de los firmes. Las características más comunes son (ROBERTS *et al.* 1996):

- **Granulometría y tamaño del árido:** Es una característica fundamental ya que influye en la resistencia mecánica de la mezcla, y no es más que la distribución de tamaños de las partículas que componen el árido, para lo que se separan las partículas que lo componen haciéndolo pasar a través de una serie de tamices dispuestos sucesivamente de mayor a menor abertura de malla, según lo especificado en la norma NLT-150 (CEDEX, 1992-2000). La granulometría óptima depende del material a fabricar, de las características que se desea que tenga, de las cargas que se le van a aplicar, de los factores ambientales a los que va a estar expuesto, de los materiales componentes, etc. Se ha sancionado por la práctica la utilización de una serie de husos granulométricos, según el material a fabricar, dentro de los que debe encontrarse la granulometría de los áridos a utilizar.
- **Dureza y resistencia a la fragmentación:** Los áridos experimentan un gran desgaste, llegando a romperse durante su vida útil, por lo que generalmente deben ser duros y bastante resistentes para resistir el machaqueo, degradación y desintegración de cualquier actividad asociada incluyendo la fabricación, el almacenamiento, la producción, la colocación, y la compactación (ROBERTS *et al.* 1996). Además, deben transmitir adecuadamente las cargas de la superficie del firme a las capas subyacentes. Los áridos que no sean suficientemente resistentes a la fragmentación y al pulimento pueden causar un fallo estructural prematuro y / o una pérdida de adherencia superficial. Existen muchos ensayos para evaluar estas características, siendo el más común el ensayo realizado en la máquina de Los Ángeles, regulado por la norma UNE-EN 1097-2 (AENOR, 2001), que consiste en un cilindro hueco que gira alrededor de su eje horizontal en el que se introduce el árido a ensayar y una serie de bolas de

fundición o acero cuya masa total depende de la granulometría del árido, y que se hace girar a una velocidad constante durante un determinado número de vueltas, calculándose el coeficiente de Los Ángeles como la diferencia entre la masa original de la muestra y la masa al final del ensayo, expresada en tanto por ciento.

- **Forma de las partículas:** La forma de las partículas gruesas afecta fundamentalmente a la resistencia del esqueleto mineral. Según su forma, las partículas se clasifican en redondeadas, cúbicas, lascas y agujas. Las lascas y agujas se pueden romper fácilmente durante la compactación o durante la vida útil de la mezcla, por lo que se limita su proporción, no debiéndose sobrepasar, en términos generales, el 30% en peso. El procedimiento de ensayo se encuentra recogido en la norma NLT – 161 (CEDEX, 1992-2000), definiéndose como índice de lascas y agujas, respectivamente, el porcentaje en peso de las partículas que son lascas (su dimensión mínima es menor que 3/5 de la dimensión media) y agujas (dimensión máxima superior a 9/5 de la dimensión media) respectivamente. Su determinación práctica se realiza haciendo pasar la fracción de áridos ensayada por dos calibres metálicos, uno de ranuras alargadas (lascas) y otro de barras de diferente altura (agujas).
- **Limpieza y adhesividad:** La superficie de los áridos debe estar exenta de polvo, suciedad, arcilla, etc, ya que si están contaminados pueden ser sensibles a la acción del agua e incluso aparecer problemas de adhesividad con los ligantes hidrocarbonados. Para cuantificar la limpieza de los áridos se utiliza el coeficiente de limpieza, definido en la norma UNE 146130 (AENOR, 2001) en el que se separa por lavado el polvo adherido a la superficie de las partículas, estando limitado en los áridos gruesos al 0,5% en peso, debiendo los áridos finos (partículas inferiores a 2 mm) estar exentos de terrones de arcilla, materia vegetal, marga y otras materias extrañas.

- **Textura de la superficie:** La resistencia al pulimento de los áridos, es decir, a perder su aspereza es importante desde el punto de vista de la resistencia al deslizamiento neumático – pavimento, por lo que es muy importante si dichos áridos se van a utilizar en capas de rodadura. Para evaluarlo se utilizan ensayos como el definido en la norma UNE 146130 (AENOR, 2001), que no es más que someter a una probeta de material, en la máquina de pulimento acelerado, a unos ciclos de pulimento con una serie de materiales abrasivos normalizados.

Las características físicas de los áridos pueden cambiar fácilmente. Así, por ejemplo, un árido nuevamente machacado puede contener más polvo (y así perder sus propiedades de ligazón con el betún para formar una mezcla bituminosa) que uno que se ha machacado, lavado y almacenado previamente.

En España, las características de los áridos a utilizar para las mezclas bituminosas están fijados en el artículo 542, Mezclas Bituminosas del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes, PG3, (BUSTOS y PÉREZ, 2004) pudiendo emplearse como áridos, el material procedente del reciclado de mezclas bituminosas en caliente en proporciones inferiores al diez por ciento (10%) de la masa total de mezcla.

Por último, reseñar en cuanto al filler o polvo mineral que, debido a su elevada superficie específica, juega un importante papel en el comportamiento de la mezcla bituminosa según su naturaleza, finura, actividad y proporción en la que entra a formar parte de dicha mezcla. En cuanto a su origen, puede ser propio, es decir procedente de la trituración de los propios áridos que integran la mezcla, o de aportación, para lo que se utilizan productos pulverulentos tales como cales, cementos, cenizas volantes, etc. En cualquier caso, es necesario tener en cuenta que debe tratarse de un material no plástico.





Fig. 0.3. Planta de fabricación de mezcla bituminosa en caliente de tipo discontinuo.



Fig. 0.4. Extendido y compactación de una mezcla bituminosa en caliente.

### Fabricación y puesta en obra

La fabricación de las mezclas bituminosas se realiza en centrales específicas, siendo actualmente las plantas más utilizadas de tipo discontinuo (dosificación por amasadas), en las que se almacenan por una parte el betún en una serie de depósitos y por otra los áridos separados por tamaños en diferentes tolvas. Dichos áridos se mezclan en frío (volumétrica) de acuerdo a la fórmula de trabajo especificada, secándose y calentándose posteriormente en el denominado tambor – secador, llegando a alcanzar temperaturas de hasta los 150 – 200 °C para facilitar su envuelta posterior con el betún, el filler de aportación y los aditivos en el mezclador, al que llegan por un elevador de cangilones después de sufrir una segunda dosificación, esta vez en peso y en caliente.

Una vez realizada la mezcla, se realiza el transporte en camiones basculantes, de modo que la temperatura de la mezcla que llega al tajo no sea inferior a la recomendada, por lo cual los camiones deben estar provistos de lona.

Previo a la extensión de las capas de MBC se deberán de ejecutar los riegos de imprimación (si se extiende sobre una superficie formada por material granular) o de adherencia (si se extiende sobre una superficie formada por material bituminoso u hormigón) según corresponda, y se deberá dejar transcurrir el tiempo de rotura necesario.

El extendido se realiza con unas máquinas específicas denominadas extendedoras, que constan de una tolva, a la que vierten los camiones volquete el material, y una unidad de puesta en obra que realiza la extensión de la mezcla bituminosa y la precompacta.

Es necesario resaltar que no se debe realizar el extendido cuando se produzcan precipitaciones intensas, ni cuando la temperatura ambiente sea inferior a 5° C para evitar pérdidas de calidad del material.

Una vez extendido el material, se procede a su compactación, que comenzará tan pronto como se observe que la mezcla puede soportar la carga sin arrollamientos o desplazamientos indebidos, iniciándose por el borde más bajo de la sección transversal, en bandas longitudinales de 70 a 120 metros solapando cada banda con la contigua. Para ello, habitualmente se utiliza un rodillo metálico vibratorio, finalizando esta con un compactador de neumáticos a alta presión (0,8-1 MPa), aunque otras veces se utilizan rodillos mixtos metálicos-neumáticos. ■

## Referencias

- AENOR (2001) Áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales de carreteras. Asociación Española de Normalización y Certificación. Madrid. España.
- BUSTOS G. y PÉREZ E. (2004) Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG3) Ed. Liteam. Madrid.
- CEDEX (1992-2000) Normas del Laboratorio de Transportes (NLT). Vol II. Ensayos de carreteras. Dirección General de Carreteras. M° de Fomento.
- CORDON, W.A. (1979) Properties, Evaluation, and Control of Engineering Materials. McGraw-Hill. New York, New York state. USA.
- EAPA (2004) Asphalt in Figures. European Asphalt Pavement Association (EAPA). Bruselas, Bélgica.
- JEFATURA DEL ESTADO (1988) Ley 25/1988, de 29 de julio, de Carreteras BOE núm. 182, de 30 de Julio de 1988. pp. 23514-23518. España
- KRAEMER, C., DEL VAL, M.A., PARDILLO, J.M., ROCCI, S., ROMANA, M.G., SÁNCHEZ, V., (2004) Ingeniería de Carreteras. Vol II Mc Graw Hill. Madrid
- MINISTERIO DE FOMENTO (2003a) Norma 6.1-IC "Secciones de Firme". Orden FOM/3460/2003, BOE núm 297 de 12 de diciembre de 2003, pp. 44274-44292, España.
- MINISTERIO DE FOMENTO (2003b) Norma 6.3-IC: "Rehabilitación de firmes" Orden FOM/3459/2003, BOE núm 297 de 12 de diciembre de 2003, pp 44244-44274, España
- MINISTERIO DE FOMENTO (2005) Plan Estratégico de Infraestructuras y Transportes Centro de Publicaciones. M° de Fomento. Madrid.
- MUENCH, S.T., MAHONEY, J.P., PIERCE, L.M. (2003) WSDOT Pavement Guide Washington State Department of Transportation's Pavement, WSDOT, Washington State. USA.
- NAPA (2001) HMA Pavement Mix Type Selection Guide, Information Series 128. National Asphalt Pavement Association (NAPA). Landham, Maryland state, USA.
- ROBERTS, F.L., KANDHAL, P.S., BROWN, E.R., LEE, D.Y. y KENNEDY, T.W. (1996) Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction. National Asphalt Pavement Association Education Foundation. Lanham, Maryland state, USA.