



Aurelio RUIZ RUBIO

INTEVIA

# Panorámica española de las mezclas bituminosas en caliente

*Spanish overview of hot-mixed asphalts*

## RESUMEN

Se revisa la situación actual de las mezclas bituminosas en nuestro país, señalando los tipos utilizados para rodadura y capas inferiores, sus características, ventajas e inconvenientes de cada tipo y los factores que intervienen en sus propiedades. Se apuntan algunas mejoras que podrían ayudar a aumentar su durabilidad, y especialmente en lo relativo a la acción del agua y resistencia a las deformaciones plásticas.

**Palabras clave:** Mezcla bituminosa, Fabricación, Puesta en obra, Dosificación, Problemas en mezclas bituminosas.

## ABSTRACT

The article reviews the current status of asphalt mixes in Spain, indicating the types used for wearing courses and lower layers, their characteristics, pros and cons and the factors involved in their properties. It points to some improvements that could help to increase their durability, particularly where water action is concerned and their resistance to plastic strain.

**Palabras clave:** Asphalt mix, Production formula, Laying, Dosage, Problems in asphalt mixes.

En España se producen alrededor de 40 millones de toneladas de mezclas bituminosas cada año, a unos 25 €/t, lo que da idea de la importancia de este sector desde el punto de vista económico.

Del funcionamiento correcto de las mezclas bituminosas dependen además unos enormes costes para los usuarios de la carretera, asociados fundamentalmente a los retrasos por obras de reparación o por mal estado de las carreteras si se producen fallos prematuros. Esto, unido a los costes de reposición, indica la rentabilidad de contar con criterios y métodos adecuados para el proyecto, dosificación, fabricación, puesta en obra y conservación de las mezclas bituminosas.

El propósito de este documento es revisar la situación actual de las mezclas bituminosas en nuestro país, apuntando algunas mejoras que podrían ayudar a aumentar su durabilidad.

## CAPAS DE RODADURA

### 1. Funciones y características de las capas de rodadura

Las capas de rodadura se encuentran en la parte superior del firme, en contacto directo con los vehículos y sometidas también directamente a la acción de los agentes atmosféricos. Las funciones principales que se les exige son:

- Seguridad en la rodadura, para que proporcionen una buena adherencia a los neumáticos en cualquier situación. Se consigue dotando a las mezclas de una macrotextura (efecto de la dosificación y tamaño máximo del árido) y microtextura (efecto del coeficiente de pulimento acelerado del árido) adecuadas.
- Impermeabilidad, para impedir la penetración del agua superficial en las capas inferiores del firme y en



la explanada. Se consigue dosificando los materiales de tal manera que los huecos en mezcla sean mínimos o disponiendo bajo la rodadura de un material impermeable.

- Regularidad superficial, mediante una puesta en obra adecuada, si bien es una cualidad que depende fundamentalmente de la conseguida en las capas inferiores.
- Comodidad en la circulación en lo relativo al ruido de rodadura, visibilidad nocturna, visibilidad en momentos de lluvia, etc. El ruido de rodadura depende fundamentalmente del contenido de huecos del material y del tamaño máximo de las partículas. La visibilidad en momentos de lluvia depende del contenido de huecos y de la textura superficial. La visibilidad nocturna depende del contraste entre la marca vial y el pavimento, que es tanto mayor cuanto más negra sea la superficie (mayor contenido de ligante).
- Es también de interés el aspecto estético, conseguido mediante superficies homogéneas y ricas en ligante, ya que las rodaduras constituyen una parte importante de la imagen que ofrece una determinada administración de carreteras. En algunas situaciones se precisa conseguir efectos estéticos con materiales coloreados, o integración en el paisaje, lo que se logra también con materiales coloreados o incoloros.
- A veces se puede buscar funciones específicas como resistencia a los disolventes, resistencia al punzonamiento por cargas estáticas, etc.

Por otro lado, las rodaduras tienen que ser duraderas, a través de una serie de características:

- Resistencia a las deformaciones plásticas.
- Resistencia al envejecimiento, ya que éste puede originar fisuraciones y desprendimientos.
- Resistencia a la desintegración, y especialmente por la acción del agua y del hielo.
- En firmes muy flexibles resistencia a la fatiga, y en vías de bajo tráfico se les suele exigir que sean deformables.

En algunos casos se busca también una capacidad de absorción de cargas. Las capas de rodadura no deben ser sin embargo excesivamente rígidas o al menos su rigidez no debe ser excesiva en comparación con la de las capas inferiores o la del conjunto del firme. En algunas aplicaciones de las capas de rodadura, como por ejemplo en los casos de rehabilitación superficial de

tramos deslizantes, esta propiedad es totalmente secundaria.

Además de las funciones señaladas a las rodaduras, igual que a todos los materiales del firme, se les exige economía y sostenibilidad ambiental, en un concepto que cada vez va más ligado a la consideración del ciclo de vida de los mismos.

## 2. Mezclas bituminosas en caliente para capas de rodadura

Los materiales disponibles para esta capa son: mezclas en caliente tipo hormigón asfáltico de granulometría continua (tipos Semidenso y Denso), drenantes (tipo PA) y discontinuas (tipos F y M).

### 2.1. Mezclas densas y semidensas para capa de rodadura

Las mezclas densas y semidensas corresponden al tipo genérico *hormigón asfáltico*. Son mezclas de granulometría continua con un fuerte esqueleto mineral y que se puede utilizar en todas las capas del firme. Es la mezcla bituminosa de empleo más generalizado en Europa. Los hormigones asfálticos pueden ser de tipo cerrado (huecos entre 3-6%), medio (6-12%) o abierto (>12%). Los que se utilizan en rodadura son de tipo cerrado.

Las mezclas semidensas (S) constituyeron en su momento la respuesta al problema de las deformaciones plásticas. Hasta su aparición se utilizaban las mezclas del *Instituto del Asfalto* americano, y especialmente las de tipo IV, densas, para rodadura y las de tipo III, más abiertas para capas de base. Ante los graves problemas de roderas producidos esos años se definió un huso granulométrico intermedio entre el IV y el III y se modificaron los criterios de dosificación utilizados hasta entonces (mayores contenidos de filler; regulación de la relación f/b, menores contenidos de betún, betunes más duros, áridos de machaqueo, filler de aportación). Ante todos estos cambios se modificó la denominación de las mezclas bituminosas y apareció la actual de mezclas densas, semidensas y gruesas.

Las mezclas semidensas están normalizadas en la *Orden FOM 1/2004*. Hay definidos 3 tipos en función del tamaño máximo, pero en rodadura sólo se utilizan las S-12 (tamaño máximo 20 mm) ó S-20 (tamaño máximo 25 mm).

El contenido de árido fino (pasa por el tamiz 2 mm) está comprendido entre el 24% y el 38%. Representando el huso de las mezclas semidensas en un gráfico granulométrico de cernidos acumulados (porcentaje que pasa por un determinado tamiz) de potencia



0,45, en el que la granulometría de máxima densidad viene dada por una línea recta que une el origen con el pasa 100% en el tamaño máximo del árido (en este caso el de las partículas de mayor tamaño), puede observarse que permiten obtener mezclas que se encuentren total o parcialmente por debajo de la línea de máxima densidad.

Esto quiere decir que pueden obtenerse mezclas semidensas con un fuerte esqueleto mineral de árido grueso. También se puede cerrar en mayor o menor grado la granulometría de manera que se consiga el contenido de huecos necesario en cada caso. El huso se solapa con el de mezclas densas en su parte superior, de manera que hay mezclas que pueden clasificarse simultáneamente en los dos tipos.

El tamaño máximo influye fundamentalmente en la macrorrugosidad de la capa, en la capacidad de absorción de cargas, en la resistencia a las roderas, en la segregación de áridos, en la sonoridad, en la compactabilidad y en el contenido de betún. Las mezclas S 20 con mayor tamaño máximo tienen más macrotextura y mejores características mecánicas, que las S 12, pero son más segregables, la superficie presenta un aspecto más heterogéneo, son más sonoras, necesitan mayores espesores de capa para compactarlas adecuadamente (la regla general es que el espesor de la capa a compactar debe estar comprendido entre 2,5 y 5 veces el tamaño máximo del árido, por tanto las mezclas S 20, cuyo tamaño máximo real es 25 mm, deben compactarse en capas de espesor superior a 5 cm) y necesitan menos betún para cubrir los áridos.

Para las rodaduras de 6 cm de espesor son más adecuadas las S 20, especialmente en situaciones críticas en cuanto a deformaciones plásticas, y para las de 5 cm las del tipo S 12, ya que las S 20 pueden presentar bastantes segregaciones en estos espesores.

Se utilizan contenidos de ligante del orden del 4,7-5% s/a, ligeramente más bajos que en las mezclas densas. Suelen ser más difíciles de compactar que estas mezclas. Son muy adecuadas para todo tipo de condiciones climáticas y de tráfico.

Las mezclas densas (D) proceden del huso tipo IV del Instituto del Asfalto. Están normalizadas en la Orden FOM 1/2004. Para capas gruesas se definen dos tipos dependiendo del tamaño máximo, D-12 ó D-20. Hasta hace unos años se incluía en el pliego una mezcla tipo D para capas finas (D-8) que se eliminó posteriormente por su falta de textura.

Las mezclas densas presentan un contenido de árido fino (pasa por el tamiz 2 mm) situado entre el 31% y

el 46%, es decir los límites del huso en este tamiz están 7 u 8 puntos porcentuales por encima de los límites de las mezclas semidensas. La mayor parte del huso está por encima de la línea de máxima densidad (gráfico de potencia 0,45). Los contenidos de ligante típicos se encuentran entre el 4,7% y el 5,2%.

En consecuencia, de la comparación de las mezclas densas y semidensas se obtiene las siguientes conclusiones:

- Las mezclas densas tienen más árido fino y por tanto una mayor superficie específica de árido que las mezclas semidensas. Por tanto necesitan más betún para envolver las partículas y conseguir el mismo porcentaje de huecos.
- Las mezclas densas tienen un menor esqueleto mineral de áridos gruesos, y por tanto son menos estables ante las cargas (más problemas de deformaciones plásticas).
- Las mezclas densas, al tener menos estabilidad intrínseca, son críticas en los contenidos de ligante, lo que quiere decir que pequeñas diferencias en el contenido de betún pueden originar importantes diferencias de comportamiento frente a las deformaciones plásticas.
- En general las mezclas densas al tener mayor contenido de arena que las semidensas tienen menos macrotextura, ya de por sí escasa en este tipo de materiales. Las granulometrías situadas en la parte superior del huso pueden llegar incluso a ser deslizantes.
- Son más flexibles que las mezclas semidensas por su mayor contenido en betún y en mortero.

Algunas veces se prefiere las mezclas densas frente a las semidensas con el criterio erróneo de que llevan más betún y por tanto son más impermeables. El mayor contenido de betún se debe, como ya se ha señalado, al mayor contenido de arena. La impermeabilidad viene dada fundamentalmente por el contenido de huecos y con ambas mezclas se puede conseguir el mismo nivel de huecos (4 a 6% para rodaduras en tráfico elevados y 3 a 5% con tráfico bajos).

De las conclusiones anteriores se deduce por tanto el campo de aplicación de ambas mezclas. En general son preferibles las mezclas semidensas por su mayor estabilidad frente a las deformaciones plásticas. Las mezclas densas exigen muchas precauciones en su dosificación si se emplean en zonas cálidas (por la posible sensibilidad a las deformaciones plásticas) o en vías de alta velocidad (por la posible falta de macrotextura). Las mezclas den-



estas pueden ser más adecuadas para mezclas en pequeño espesor en firmes muy flexibles (vías de bajo tráfico) o, como señala el PG-3, para rodaduras de arcenes.

En la norma 6.1-IC sobre secciones de firmes se limita el empleo de las mezclas S y D a los tráfico T2 e inferiores. Las razones para que no se utilicen para tráfico elevados pueden encontrarse en algunos problemas de deformaciones plásticas producidos con estas mezclas en los últimos años y en que se quiere primar la macrotextura por motivos de resistencia al deslizamiento, sonoridad y eliminación de agua. Por otro lado la utilización de mezclas drenantes y micros permite reducir el espesor de la capa de rodadura y en consecuencia el consumo de áridos de calidad.

## 2.2 Mezclas drenantes

Las mezclas drenantes son mezclas bituminosas utilizadas en rodadura, que se dosifican con el objetivo principal de conseguir un gran número de huecos interconectados que permitan la percolación del agua de lluvia y su evacuación hacia las zonas laterales fuera de la calzada. Cambian el concepto tradicional de impermeabilizar la superficie de la carretera, trasladando esta función a la capa inferior o a la interfase entre ambas.

Las mezclas drenantes, aunque inicialmente empleadas en el Reino Unido en aeropuertos y luego en USA bajo forma de tratamiento superficial en capa de 2 cm para luchar contra el deslizamiento, han experimentando una evolución importante al desarrollarse posteriormente con el concepto mucho más amplio de ser una capa de rodadura capaz de absorber el agua de lluvia, eliminando el agua superficial que se interpone entre el neumático y el pavimento.

Posteriormente se vio la capacidad de estas mezclas para absorber parte del ruido generado por la rodadura de los vehículos, lo que aumentó aún más su empleo haciendo de ellas uno de los materiales de carreteras con desarrollo más espectacular de los últimos veinticinco años. Han marcado un nivel de características superficiales que no existía hasta que aparecieron estas mezclas, y que ahora sirve de modelo para nuevos desarrollos.

Se introdujeron por primera vez en Europa a finales de los años 70 y en 1.980 en España, generalizándose su empleo a partir de 1.985. Están normalizadas en la Orden FOM 1/2004.

En Europa hay mezclas drenantes con granulometrías continuas o discontinuas, pero en España se dosifican con granulometrías continuas. Inicialmente se diseñaron con contenidos de huecos entre el 15 y el 18%, pero

estas mezclas se colmataban muy rápidamente y actualmente se exige un porcentaje mínimo del 20%, y es muy frecuente el del 22%. Se han desarrollado ya mezclas con porcentajes de huecos del 28%.

Para conseguir el objetivo de dotar a la mezcla con un gran porcentaje de huecos, debe reducirse drásticamente el contenido en mortero. Mientras que los porcentajes de áridos de tamaños inferiores a 2 mm se encuentran entre el 31 y el 46 % en las mezclas para rodadura tipo denso, en las mezclas drenantes los normalizados se encuentran entre el 9 y el 20%, y en la práctica se va a contenidos del orden del 10-15%, o incluso menores si se quieren conseguir huecos en mezcla superiores al 25%.

Se dispone de una única granulometría, PA-12. Aunque se define como huso tipo 12, se trata de un huso abierto en su cabeza de manera que se pueden utilizar tamaños máximos de 10 mm, que son los más adecuados en capas de 4 cm y reducen más la sonoridad de la rodadura. Si se colocan en capas de 5 cm conviene ir a tamaños máximos de 12 mm. Desde los primeros momentos se utilizaron con estas mezclas ligantes modificados, tipo BM-3a o 3b, para aumentar la resistencia a los desprendimientos que es el principal problema de estos materiales. Los contenidos de ligante son del orden del 4,5%.

Sus ventajas principales son las ya señaladas de eliminación del agua en momentos de lluvia, lo que redonda en la eliminación del "aquaplaning" (hidroplaneo) y de las salpicaduras, y en una mejor visibilidad, con los consiguientes efectos en la seguridad y comodidad en la conducción.

Las mezclas drenantes presentan una mejor resistencia al deslizamiento que las convencionales a alta velocidad, y especialmente en presencia de agua, consecuencia de su capacidad de eliminación de agua y gran macrotextura. A baja velocidad la resistencia al deslizamiento es del mismo orden o menor que las mezclas convencionales por la menor microtextura, ya que en las mezclas drenantes ésta se debe exclusivamente a los áridos gruesos al no haber prácticamente mortero en la superficie. Hay que tener en cuenta que la resistencia al deslizamiento en los primeros meses de servicio se puede ver impedida por la presencia de una película de ligante, lo que reduce la adherencia neumático-pavimento.

A pesar de la mejora de la resistencia al deslizamiento, se han hecho estudios sobre estadísticas de accidentes en Holanda y Francia que muestran que las mezclas drenantes son igual de seguras, pero no más, que las mezclas densas convencionales. La idea inicial de que estos mate-



riales son mas seguros no se refleja en la práctica. Puede explicarse por la psicología del conductor que compensa las mejoras con cambios en sus hábitos de conducción.

En muchos proyectos la reducción de ruido es la característica más apreciada en las mezclas drenantes. Son los materiales más efectivos en la reducción de ruido en frecuencias altas, mientras que en bajas frecuencias no hay mucha diferencia. La reducción con respecto a rodaduras convencionales se encuentra generalmente entre 2 y 6 dB(A). Los tamaños menores de árido favorecen la reducción de ruido. Por otro lado el incremento de la emisión de ruido con la velocidad es menor que con otros materiales.

Las rodaduras drenantes se van colmatando con una relativa rapidez, particularmente en zonas con poco tráfico. El tiempo de colmatación varía según las condiciones entre 3 y 7 años. Cuando están colmatadas mantienen no obstante una cierta drenabilidad de la superficie que favorece la adherencia rueda-pavimento a velocidad elevada y la reducción de proyecciones de agua, a la vez que se mantiene una fuerte macrotextura. Se está trabajando y avanzando en el diseño de los equipos de limpieza, compuestos hasta ahora por camiones provistos de un equipo de agua a presión y de un sistema de aspiración conectado a un depósito provisto de filtros. Estos equipos solo son parcialmente efectivos y tienen que aplicarse rápidamente a partir de la puesta en servicio de las mezclas, aunque no existe consenso sobre la estrategia más adecuada de limpieza y de la eficacia en cuanto al coste.

El comportamiento invernal es uno de los puntos delicados de las mezclas drenantes. En las zonas con heladas, la cuestión del mantenimiento invernal es una preocupación importante que limita el empleo. La temperatura en superficie es inferior a la de las mezclas convencionales, la humedad permanece más tiempo y los fundentes sin embargo duran menos en la superficie. En climas de intensos fríos deben organizarse los equipos de mantenimiento de forma aún más efectiva que en las situaciones convencionales, actuar con anticipación y emplear más fundentes. En aquellos casos que no puedan tomarse estas precauciones es mejor evitar la colocación de mezclas drenantes.

No se han apreciado problemas de formación de roderas o de fatiga en estas mezclas. La forma más frecuente de fallo es la pérdida de gravillas. Son mezclas que resisten mal los efectos tangenciales, sobre todo en los primeros momentos después de su extensión, y que se deterioran fácilmente en caso de accidentes, reventones de neumáticos, etc.

Son mezclas con una puesta en obra más delicada que los hormigones bituminosos, y son especialmente sensibles a la pérdida de temperatura. Los fallos prematuros se deben fundamentalmente a malas prácticas de puesta en obra, a defectos en los materiales, especialmente por utilización de arenas sucias o plásticas o a situaciones extremas de solicitaciones tangenciales. En este último caso es conveniente recurrir a cerrar algo la mezcla, aplicar neumáticos después de los rodillos (después de que han perdido algo de temperatura) o utilizar ligantes muy modificados. Las capas de rodadura con mezclas drenantes pueden tener una durabilidad semejante a las mezclas densas convencionales pero suelen exigir más labores de mantenimiento.

Todo lo anterior señala como campo de aplicación de las mezclas drenantes el de zonas con numerosos días de lluvia al año, o zonas con problemas de ruido de circulación. La utilización estándar es en capas de 4 cm de espesor sin limitaciones de tráfico pesado o de clima, ya que en zonas no lluviosas pueden utilizarse para reducir el ruido de rodadura. En la nueva *Norma 6.1-IC* se limita su aplicación en función de las condiciones climáticas a:

- zonas lluviosas, con régimen de lluvias razonablemente constante, o excepcionalmente en zona seca en la que se de un régimen de precipitación corto pero intenso durante un número significativo de días al año y en tramos de pequeña pendiente longitudinal (inferior a 1,5%).
- zonas con altitudes iguales o inferiores a los 1200 m sin problemas de nieve o formación de hielo).

Además se dan otras limitaciones complementarias:

- las carreteras deben tener sus accesos pavimentados,
- el tráfico debe ser suficiente (IMD = 5000 vehículos/día),
- no se utilizarán sobre tableros de estructuras que no estén debidamente impermeabilizados, y en todo caso deberán preverse sistemas específicos de captación y de eliminación de agua infiltrada a través de la superficie del pavimento, y
- la longitud pavimentada deberá ser superior a 500 m.

Por otro lado, se señalan especialmente para autopistas y autovías urbanas y periurbanas con intensidad de tráfico superior a 10.000 vehículos/día, aunque no obstante se debe justificar su empleo.



### 2.3. Mezclas discontinuas para capas de rodadura

Las denominadas *mezclas discontinuas en caliente* para capas de rodadura se desarrollaron en Alemania ("stone mastic asphalt") buscando mezclas con contenidos elevados de betún que no tuviesen problemas de deformaciones plásticas y que se pudiesen compactar en capas relativamente finas. En Francia se modificó el diseño reduciendo algo el contenido de betún respecto al modelo alemán para conseguir mezclas con mayor textura. Estas últimas mezclas se utilizaron por primera vez en España en 1.985, normalizándose en 1.996 en uno de los proyectos tipo de la *Subdirección General de Conservación del Ministerio de Fomento*. Posteriormente se incluyeron en la *Orden Circular 322/97 T* de la *Subdirección General de Tecnología* y actualmente figuran en la *Orden FOM 1/2004*.

En las mezclas discontinuas se eliminan tamaños intermedios (entre 2 mm y 4 mm) que son los que separan los áridos gruesos, manteniendo un fuerte esqueleto mineral de áridos gruesos en contacto entre sí y un contenido suficiente de mortero que rellena los huecos entre áridos gruesos. Esta dosificación consigue una buena resistencia frente a las deformaciones plásticas, una gran textura (por la reducción de parte de la arena), y mantiene la durabilidad de la mezcla al tener un contenido elevado de betún y mortero. Además facilita la compactación en capas de pequeño espesor.

En el Pliego se han incluido dos materiales, los denominados *tipo F* (de *capas Finas*), que son los que más se han utilizado hasta ahora, con espesores entre 2,5 cm y 3,5 cm, y los denominados *tipo M* (de *Monogranular*), que tienen menos mortero y dan algo más de textura que los de tipo F. Los tamaños máximos de estas mezclas son 8 mm y 10 mm. Por otro lado, aunque se está utilizando en España, no se incluyen en el artículo las granulometrías de tamaño máximo 6 mm, por su empleo claramente urbano, fuera de los objetivos del PG-3.

En estas mezclas se ha fijado la discontinuidad entre los tamices 2 mm y 4 mm, limitando el retenido parcial máximo entre estos tamices al 8%. Es pues obligado, especialmente con las mezclas tipo F, trabajar con arenas 0/2 mm, y con fracciones que tengan pocas *colas* o *cabezas*.

El porcentaje de material que pasa por el tamiz 2 mm está comprendido entre 11 y 22% en el huso M y entre el 18 y el 32% en el F, es decir son materiales con contenidos de gruesos en el entorno del 75%. El árido fino puede ser calizo ya que en este tipo de material la textura viene dada fundamentalmente por el árido grueso. El contenido de polvo mineral es del orden del 5 al 7% en el tipo M y entre el 7 y 9% en el F, por lo que en general necesitan de filler de aportación.

Las mezclas M requieren contenidos de betún del orden del 5,2%. En las mezclas tipo F hay dos modalidades. En la primera, más generalizada, se utilizan betúnes en porcentajes de aproximadamente el 5,8%, generalmente modificados. Las mezclas así obtenidas pueden ser relativamente permeables. En la segunda, que responde a la técnica original alemana, se va a porcentajes de betún del 6,5% o superiores, añadiendo fibras de celulosa para evitar escurrimientos de betún, con lo que se consiguen mezclas impermeables.

Necesitan riegos de adherencia espesos, tanto para asegurar un buen agarre, ya que la interfase está sometida a esfuerzos importantes, como para conseguir impermeabilizar el firme, ya que generalmente no se consigue con la rodadura. Las capas tipo M son las que presentan características más extremas en estos dos aspectos y por lo tanto son las más necesitadas de un riego de adherencia espeso. Hasta ahora este riego se conseguía mediante extendedoras con barras de riego incorporadas. Hoy en día la tendencia es a utilizar riegos de adherencia transitables (*termoadherentes*), con emulsiones especiales que una vez rotas permiten la circulación de los camiones de obra. Es conveniente disponer bajo ellas capas de mezcla bituminosa cerrada, tipo 5.

Las principales formas de fallo son las exudaciones o pérdida de textura por exceso de riego de adherencia, exceso de betún en la mezcla o ambos, ligeras deformaciones plásticas en algún caso en que se dosifican con contenidos de mortero elevados, pérdidas de gravillas relacionados generalmente con la calidad de las arenas o falta de discontinuidad en la granulometría (la falta de discontinuidad en la granulometría, muy frecuente y especialmente grave en las mezclas tipo F, puede producir también pérdida de textura), falta de ligante o envejecimiento.

Las mezclas discontinuas han mostrado ser una buena solución para capa de rodadura ya que pueden compactarse en pequeños espesores, presentan una gran macrotextura, y por tanto una buena resistencia al deslizamiento a velocidades altas, y permiten introducir dotaciones elevadas de betún (y aumentar por tanto la durabilidad) sin problemas de formación de roderas. Además, al poderse colocar en capas de pequeño espesor, permiten minimizar la necesidad de áridos de calidad para la rodadura.

Por otro lado tienen, aunque en mucho menor grado, algunas de las características de las mezclas drenantes: capacidad de drenaje de agua gracias a su macrotextura y menor sonoridad que las mezclas convencionales.



Sus principales inconvenientes son la necesidad de disponer de áridos con una discontinuidad 2/4 mm, su precio, más elevado que el de las mezclas convencionales y su capacidad estructural, menor que la de los hormigones bituminosos.

En la *Norma 6.1-IC* se limita el empleo de las mezclas F para tráfico T2 e inferiores. Probablemente la razón es la mayor macrotextura aportada por las mezclas tipo M, aunque ambos tipos pueden tener macrotexturas muy elevadas. La utilización de mezclas M exige áridos de mucha más calidad (Los Angeles menor de 15 para tráfico T00 a T2) que las mezclas F (Los Angeles inferior a 20), aunque llevan algo menos de betún y son menos sensibles a la falta de discontinuidad.

## MATERIALES BITUMINOSOS PARA CAPAS INFERIORES

### 1. Funciones y características de las capas inferiores

Se consideran incluidas en las capas inferiores bituminosas tanto las *capas intermedias* con las *capas de base*. Las capas de base tienen una función fundamentalmente estructural. Generalmente van cubiertas por una capa intermedia para conseguir una regularidad superficial adecuada, lo que es difícil de alcanzar con los grandes espesores típicos de las capas de base. En cualquier caso, los firmes se proyectan de manera que la función resistente no sólo la desarrolle la base sino que se reparta entre las distintas capas: rodadura, intermedia, base y subbase.

Por otro lado, algunas capas de rodadura han perdido la función impermeabilizante, que se asigna a la capa intermedia junto con los riegos de adherencia. También se aprecia una tendencia a disponer rodaduras finas, sin apenas función estructural.

Por consiguiente, las principales funciones que tienen asignadas las capas intermedias y de base son las siguientes:

- Absorber y resistir la mayor parte de las tensiones (rigidez suficiente), de manera que las que lleguen a la explanada sean aceptables para ella.
- No presentar deformaciones permanentes (fundamentalmente las intermedias).
- Ser resistentes a la fisuración por fatiga (fundamentalmente las capas de base).

- Y en el caso de rodaduras porosas o tipo M, impermeabilidad (capas intermedias).

### 2. Mezclas bituminosas en caliente para capas intermedias y de base

Todas las mezclas bituminosas que se utilizan en capas intermedias y de base son de tipo *hormigón asfáltico*: mezclas densas y semidensas para capa intermedia y semidensas, gruesas y de alto módulo para capa de base.

#### 2.1. Mezclas gruesas, densas y semidensas

En la actual *Norma 6.1-IC* se admiten mezclas tipo D y S en capa intermedia en espesores de 5 a 10 cm y mezclas tipo S, G y M en capa de base en espesores de 7 a 15 cm, para todo tipo de tráfico.

Las *mezclas densas y semidensas* de capa intermedia son del tipo D 20, S 20 y S 25. Ya se han señalado antes las características y propiedades de estas mezclas, aunque en esta capa el contenido de ligante suele ser menor (del orden del 4,2 al 4,5%). Las capas intermedias deben ser resistentes a las roderas y suficientemente cerradas como para limitar la entrada del agua hacia las capas inferiores.

Por las razones señaladas anteriormente de resistencia a las roderas son preferibles las mezclas Semidensas a las mezclas Densas. Por otro lado, las mezclas S 25, con un tamaño máximo de árido de 4 cm no se compactan fácilmente en estas capas intermedias (con la excepción si acaso de los espesores extremos de 10 cm), producen segregaciones y es más difícil conseguir con ellas una buena regularidad, y por tanto no son recomendables. En consecuencia la mezcla bituminosa más adecuada para capa intermedia, de entre las admitidas en el PG-3, es la S 20.

Las *mezclas gruesas (G)* proceden del huso tipo III del *Instituto del Asfalto*. Están normalizadas en la *Orden FOM 1/2004*. Para capas gruesas se definen dos tipos dependiendo del tamaño máximo, G-20 ó G-25.

Las mezclas gruesas presentan un contenido de árido fino (pasa por el tamiz 2 mm) situado entre el 18% y el 32%, es decir los límites del huso en este tamiz están 6 puntos porcentuales por debajo de los límites de las mezclas semidensas, pero se solapan con ellas prácticamente en la mitad del huso. La mayor parte del huso está por debajo de la línea de máxima densidad (gráfico de potencia 0,45). Los contenidos de ligante típicos se encuentran entre el 3,5% y el 4%. Los mayores tamaños máximos exigen menores contenidos de ligante.



Las mezclas semidensas para capa de base son las de tipo S 25. Hay que cuidar su dosificación ya que mientras que por ejemplo el huso S-12 permite dosificaciones con esqueleto fundamentalmente grueso, el huso S-25 se mantiene siempre por encima de la línea de máxima densidad y por tanto es más crítico a la dosificación.

Actualmente las más utilizadas como capa de base son las mezclas gruesas, y generalmente pobres en ligante. No se tiene en cuenta que el bajo contenido de mortero y de betún de estas mezclas hace que tengan un gran contenido de huecos y en consecuencia una gran tendencia a la fisuración por fatiga o a la reflexión de grietas, ya que éstas se inician por las heterogeneidades (huecos) de las capas bituminosas y su capacidad de retrasar su inicio está directamente relacionada con el contenido de betún (cuanto más betún, más resistente a la fatiga es la mezcla).

Las mezclas gruesas generalmente utilizadas (escaso mortero y escaso contenido de betún) tienen también una baja capacidad de soporte. Para estas capas de base, y especialmente para la mejora del comportamiento a fatiga, serían más adecuadas las mezclas semidensas o en todo caso mezclas gruesas situadas en la parte superior del huso más ricas en mortero y con contenidos de betún no inferior al 4,5%. Esto es especialmente conveniente en el caso de las mezclas bituminosas que van directamente sobre materiales tratados con cemento.

Las mezclas bituminosas se utilizan en capa de base en espesores comprendidos entre 6 y 15 cm. Generalmente no se utilizan tongadas gruesas (superiores a 9 cm) por miedo a que se perjudique la regularidad final y por posibles dificultades en la compactación. Con los medios de que se dispone hoy en día es posible colocar espesores de hasta 15 cm sin problemas de compactación y con una regularidad final adecuada. Un mayor empleo de capas gruesas podría llevar a reducir el número de capas y por tanto superficies de contacto, lo que evitaría despegues que son muy perjudiciales para los firmes.

## 2.2 Mezclas de alto módulo

Las mezclas de alto módulo aparecieron en España a comienzos de los años noventa y han tenido un cierto desarrollo debido a dos aspectos fundamentales: permiten la reducción del espesor de la capa de base por su módulo elevado y tienen una resistencia a fatiga adecuada. Esta reducción de espesor limita el volumen de materiales a colocar y reduce el tiempo de ejecución. Se están utilizando con éxito admitiendo reducciones de espesor respecto a la capa que sustituyen comprendidos entre el 20 y el 30%, dependiendo de la Administración.

Se trata de un tipo especial de mezclas en caliente con betunes duros, lo que permite utilizar altas dosificaciones de ligante (entre el 5,5 y 6% s/a) sin que repercuta en la estabilidad de la mezcla, dotándola además de buena resistencia a fatiga, análoga a la de las mezclas semidensas convencionales, y a las deformaciones permanentes. Son mezclas cerradas cuyo huso granulométrico es continuo, similar al de las mezclas semidensas, con áridos de 20 - 25 mm de tamaño máximo, pero corregidas en la fracción fina, de forma tal que el contenido en filler sea elevado (7-8%).

Se deben colocar en espesores mínimos de 6-7 cm, para evitar problemas de rotura frágil o de enfriamiento rápido durante la puesta en obra. Debido a la elevada consistencia del ligante, es obligado emplear temperaturas de fabricación y puesta en obra más elevadas que en las mezclas convencionales (10-20°C). Son muy adecuadas para capas de base en firmes nuevos para tráficos altos, capas antiroderas, refuerzos (para reducir espesores) o zonas con limitaciones de cotas. Necesitan una rodadura que le aporte las características superficiales, para lo cual son muy aptas las mezclas discontinuas o las mezclas drenantes.

En la actual *Norma 6.1-IC* se permite la utilización de estos materiales en secciones con espesor de mezcla bituminosa igual o superior a 25 cm y con explanadas de categoría E2 y E3, con una reducción de espesor de 20%. Por otro lado se obliga a mantener una capa intermedia, que no sea de alto módulo, lo que ha limitado enormemente su empleo.

## PRINCIPALES AVANCES DE LOS ÚLTIMOS AÑOS

En los últimos 10 años se han producido avances destacables en las mezclas bituminosas, entre los que se pueden destacar:

- Se impusieron los *betunes modificados*, con ventas del orden de 150.000 t al año. Empezaron a utilizarse los betunes tipo BM-I no desarrollados anteriormente. Los avances en la técnica de los ligantes modificados suponen uno de los aspectos más notables de la técnica moderna de carreteras. Se ha olvidado ya el planteamiento pasivo de ver qué aplicaciones se podían dar a los limitados betunes existentes y se ha pasado a una tecnología activa de diseño de betunes, incorporando a ellos los modificadores necesarios que permitan obtener el ligante adecuado para cada situación, incluso para las más complicadas.





- Se empezaron a poner en obra los *micros tipo M*, con más textura que los F y algunas características de las mezclas drenantes. El consumo de ambos tipos de micros, F y M, igualó a las mezclas drenantes, que mostraron un retroceso. Han surgido con fuerza las mezclas discontinuas dentro de las opciones de conservación, como alternativa a las lechadas o microaglomerados en frío.
- Las *mezclas de alto módulo*, que comenzaron a utilizarse con una cierta generalización a comienzos de los años 90 con muy buenos resultados, vieron muy frenado su desarrollo por las nuevas especificaciones que obligan a colocar una capa intermedia convencional entre la base de alto módulo y la rodadura, lo que disminuye enormemente su interés económico.
- Se empezaron a generalizar las *emulsiones termoadherentes* para riegos de adherencia. El renovado interés en estos riegos tuvo dos orígenes. Uno fue la percepción de que la falta de adherencia es consecuencia de muchos fallos en nuestras carreteras. Otro fue la necesidad de colocar riegos de adherencia más espesos que los habituales para preservar, entre otras cosas, la impermeabilidad del firme que algunas de las modernas capas de rodadura no aseguran. Inicialmente se intentó aumentar la dotación y asegurar la integridad de los riegos mediante las extendedoras con barra de riego incorporado, pero su precio elevado y las dificultades operativas impidieron que se generalizasen. Las emulsiones termoadherentes, fabricadas con betún duro y en algunos casos con betunes modificados han terminado imponiéndose (5.000 t en el año 2003). Esta preocupación por la adherencia entre capas ha llevado también al desarrollo de ensayos para medirla, relativamente recientes y todavía no normalizados.
- Mejoró considerablemente la *regularidad superficial*. El empeño en la mejora de la regularidad superficial es debido a que cuando se circula sobre una superficie regular se obtiene un gran número de ventajas para los usuarios, como reducciones en los costes de mantenimiento de los vehículos y en el desgaste de los neumáticos, menor fatiga en la conducción, y menos consumo de combustible. En este campo se han conseguido grandes mejoras debido al aumento de las exigencias de las especificaciones, que han sido a su vez posibles por desarrollos en los equipos de extensión con nuevos elementos de control de gran precisión, reglas de gran poder de compactación y a mejoras en procedimientos.

## PRINCIPALES MEJORAS DESEABLES EN LAS MEZCLAS BITUMINOSAS

Hay todavía muchos campos de mejora en el campo de las mezclas bituminosas. Se va a señalar a continuación de manera resumida las que se consideran de mayor interés.

### 1. Mejoras de diseño

Uno de los principales problemas actualmente en las mezclas bituminosas es la durabilidad, asociada generalmente a envejecimientos (zonas térmicas calurosas) y a agrietamientos prematuros (también a defectos de puesta en obra como se indica posteriormente).

Los principales factores que intervienen en el envejecimiento son los debidos a contenidos bajos de betún. Se deberían estudiar procedimientos para introducir más betún en las mezclas bituminosas sin que se perjudiquen otras características. España es el país europeo que utiliza contenidos menores de betún en las mezclas, por debajo incluso de Italia, Portugal o Francia. Los bajos contenidos de betún, y por tanto el envejecimiento, se dan especialmente en zonas cálidas en las que los problemas son más acusados y en mezclas tipo semidenso, aunque también se ha observado el fenómeno en las mezclas drenantes o en los micros discontinuos.

Otro aspecto a mejorar es la resistencia a fatiga de las capas de base, que al ser tan baja refleja rápidamente cualquier defecto en el apoyo o en la ejecución del firme, especialmente en firmes flexibles de poco espesor y en firmes semirrígidos. El empleo de las mezclas tipo grueso con escaso mortero y betún debería limitarse estrictamente y en cambio fomentarse el de mezclas tipo semidenso con contenidos mínimos de betún del 4,5% y huecos en el entorno del 6%. Además debería introducirse el nuevo equipo Marshall de mayor tamaño de molde para poder dosificar adecuadamente las mezclas con tamaño máximo de árido de 25 mm. El cambio de concepción de estas mezclas podría permitir en algunos casos la reducción de espesores de firme.

### 2. Dosificación de las mezclas

Los directores de obra deberían exigir siempre que se realicen los ensayos de dosificación pertinentes de entre los recogidos en el Pliego. Es muy frecuente que no se realicen los ensayos de pista de laboratorio o de inmersión-compresión.

Hay que prestar también una mayor atención al problema de la sensibilidad al agua de las mezclas, que origina muchos problemas de lavado de áridos en la cara supe-



rior e inferior de las mezclas (y estos últimos a su vez a fallos por fatiga al separar las capas). La no utilización de cemento como filler (estando prevista en la fórmula de trabajo) o la caída en desuso de los activantes inciden en este problema. La falta de oferta de árido fino de la fracción 0/2 (o su coste) obliga a restringir la utilización de arenas calizas lo que supone un problema añadido en la adhesividad de las mezclas bituminosas (otras veces se obvia la especificación y se utiliza arena caliza con el riesgo consiguiente de que la mezcla sea deslizante).

### 3. Materiales

En los últimos años se está observando una cierta dejadez hacia el cumplimiento de la discontinuidad en la granulometría de las mezclas discontinuas, debido probablemente a los inconvenientes encontrados en las canteras para el suministro de fracciones 0/2. Esta circunstancia está llevando a mezclas de menor textura que la esperada, y mucho menos duradera.

Otro problema observado es que la utilización preferente de mezclas tipo M obliga al empleo de áridos muy duros, especialmente ofitas. Las ofitas tienen frecuentemente problemas de contaminaciones por partículas blandas y de plasticidad en los finos, que si no se controlan pueden producir desprendimientos.

Debería controlarse adecuadamente la inclusión en las mezclas bituminosas del filler de aportación.

Últimamente se están detectando problemas en las mezclas bituminosas que deberían haberse evitado con un control de calidad adecuado. A veces se llega a dar la situación de que se cuenta con los datos de control necesarios y que se podría haber evitado un problema pero no se ha hecho por falta de atención o de criterio. Muchos de los problemas de roderas se deben a esta causa.

### 4. Fabricación

Falta de control sobre temperaturas de fabricación, con el consiguiente problema de envejecimiento, ya que se tiende a calentar a temperaturas algo elevadas para facilitar luego la compactación.

### 5. Puesta en obra

En la puesta en obra se observan dos problemas muy generalizados. Uno es el de las segregaciones, que originan zonas débiles que llevan al inicio de ruina del firme. Otro es el de las juntas en frío especialmente longitudinales, en las rodaduras, que no se tratan adecuadamente y constituyen el inicio de deterioros posteriores.

## PRINCIPALES LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Las novedades que pueden esperarse para los próximos años se basan en lo que está empezando a desarrollarse ahora en España, las novedades en otros países o lo que se deduce de las políticas españolas y europeas a corto plazo en materia de infraestructuras y de investigación en carreteras.

En relación con los materiales y técnicas que están ya en uso o empezando a aplicarse en España pueden esperarse las siguientes mejoras.

En lo relativo a las *mezclas drenantes*, la investigación en España no ha avanzado apenas desde que se generalizaron a mitad de la década de los ochenta. Hay que esperar grandes mejoras en los próximos años para estas mezclas queridas por los usuarios pero rechazadas en muchos casos por los técnicos. El principal campo de desarrollo es el de conseguir una mayor resistencia a la disgregación, especialmente en zonas críticas, lo que puede hacerse mediante mayores películas de ligante, adición de fibras o filleres especiales, ligantes más modificados, o revisando las técnicas de dosificación o puesta en obra.

Otro campo de trabajo es el de alargar la durabilidad de las propiedades drenantes, para lo que deberían experimentarse las técnicas de doble capa, que se refieren posteriormente o las de aumentar el tamaño de los huecos. Quedan todavía otros aspectos que hay que mejorar y en los que se debían producir desarrollos como los del ruido, que se comentarán posteriormente, la conservación invernal, técnicas específicas para pequeñas reparaciones y grandes rehabilitaciones y mezclas drenantes adecuadas para zonas urbanas.

Algunas de las técnicas que deberían tratarse prioritariamente son:

- Construcción de mezclas drenantes en doble capa, en la que se coloca una capa superior muy delgada con mezcla bituminosa de tamaño de árido 4/6 mm, que consiguen una superficie regular y disminuyen el ruido y otra inferior de 3 a 6 cm de espesor con material 10/14 mm. La superior filtra las impurezas y es fácil de limpiar. La inferior es difícil de colmatar por el gran tamaño de huecos. Este tipo de mezclas se está utilizando ya en varios países europeos (Países Bajos, Dinamarca, Italia) y en Japón, alcanzándose reducciones de ruido de 2 dB más que con las drenantes convencionales. Se ha desarrollado una extendidora que permite extender las dos capas en una única pasada.



- Otra línea interesante de estudio es la de las denominadas mezclas *poroelásticas*, desarrolladas en Suecia, en las que se incorpora caucho de neumáticos como parte o único constituyente del árido, y con resinas de poliuretano como ligante, llegando a alcanzar el 30% de huecos. La elasticidad evita vibraciones, lo que supone otro efecto adicional para la reducción del ruido. Se han conseguido reducciones de ruido de 12 a 15 dB mayores que con las mezclas asfálticas convencionales, pero todavía se tiene que mejorar la resistencia al deslizamiento.
- En este mismo sentido se está también trabajando en mezclas drenantes convencionales en capa única con gran contenido de huecos, superior al 25%, y en mezclas con mayores tamaños máximos y granulometrías discontinuas, de manera que se pretende conseguir mezclas con huecos de mayor tamaño que no se colmaten fácilmente pero que además puedan limpiarse con mayor facilidad.
- Se está investigando también el efecto de una disminución aún mayor del ruido de rodadura mediante tamaños máximos más pequeños, tipo 0/6, generalmente con discontinuidad 2/4. Se asegura que este tipo de diseño mejora además la resistencia al deslizamiento y que mejora la drenabilidad al aumentar el número de huecos (aunque estos son de menor tamaño).

En lo relativo a las *mezclas discontinuas tipo F o M*, hay mejoras desarrolladas en otros países que acabarán introduciéndose en España, como las de disminución de espesores mediante el empleo de maquinaria especial, que permite que el campo de aplicación se solape con los tratamientos superficiales, y la incorporación de fibras o filleres especiales para aumentar su durabilidad y especialmente la de la textura superficial.

Otro campo de trabajo es el del empleo de *mezclas con granulometría discontinua*, semejantes a las de las capas finas, para ser utilizadas en capas intermedias o (de base), ya experimentado con éxito en otros países.

En algunos países se trabaja en el empleo de *mezclas para capa de base con tamaño de áridos elevado* (hasta 40 ó 50 mm), que presentan las ventajas de una mayor resistencia a las deformaciones plásticas, menores contenidos de ligante y menores necesidades de machaqueo de áridos.

Las *mezclas bituminosas de alto módulo* tienen un gran interés porque permiten reducir el volumen de los materiales empleados en la obra, preservándose recursos naturales y reduciéndose los tiempos de ejecución. Permiten también trabajar con algunos áridos margina-

les aplicando de nuevo la posibilidad de una utilización óptima de los recursos. Se está experimentando en Francia con mezclas de muy alto módulo que utilizan un betún aún más duro, del tipo 0/10, lo que lleva a obtener módulos de capa entre 20.000 y 25.000 MPa. Este material puede llevar a reducciones de hasta el 50% del espesor de los materiales bituminosos.

También se han normalizado en otros países mezclas de alto módulo para capas de rodadura. La formulación se modifica para mejorar la macrotextura y reducir los riesgos de fisuración por rotura frágil a flexión o térmica. Estas mezclas suelen incorporar a sus constituyentes fibras y/o ligantes modificados para dotar al producto de una mayor flexibilidad.

Por otro lado, las *medidas de seguridad y de la salud* tendrán probablemente un gran desarrollo en la próxima década. Se exigirá cada vez en mayor medida a los constructores que utilicen métodos de construcción y materiales que tengan menos impacto sobre la seguridad y salud de los trabajadores. Hay numerosos grupos de investigación europeos y norteamericanos que están trabajando en estos asuntos. Por ejemplo, se están modificando los equipos de fabricación de mezclas bituminosas (mejora de los filtros) o de extendido (incorporación de sistemas de ventilación que alejen los humos de los trabajadores).

Entre las líneas prioritarias se encuentra también la de la *preocupación por el medioambiente* y sus efectos: emisiones de CO<sub>2</sub>, análisis del ciclo de vida o LCA, temperaturas de fabricación y puesta en obra de las mezclas bituminosas inferiores a las convencionales, etc.

Por último hay que señalar el impacto que sin duda tendrá la adopción de la *normativa CEN*, como el cambio de procedimientos de ensayo, la necesidad de adaptar las especificaciones a los nuevos ensayos y el coste de la marca que se sumará al coste de las ya generalizadas certificaciones de producto.

Deberían también estudiarse las ventajas de introducir las especificaciones basadas en el comportamiento en alguna de sus modalidades. En varios países europeos ya se está experimentando con la definición de materiales por prestaciones (durabilidad del firme) o por propiedades ingenieriles (módulo que se debe conseguir por ejemplo), para abandonar las especificaciones de tipo receta en las que define exactamente los materiales que hay que construir y se va guiando al contratista por todo el proceso. Los nuevos sistemas de contratación y el interés con compartir con los contratistas el riesgo asumido ayudará a la implantación de estos sistemas. ■