

**ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE
CAMINOS, CANALES Y PUERTOS**

**METODOLOGIA PARA LA
CARACTERIZACION DE LIGANTES
ASFALTICOS MEDIANTE EL EMPLEO
DEL ENSAYO CANTABRO**

Autor: Jorge-Rodrigo Miro Recasens
Director: Felix Edmundo Perez Jimenez

Barcelona, marzo de 1994

Capítulo 2

LIGANTES BITUMINOSOS. NATURALEZA Y COMPOSICION

1. INTRODUCCION

Los materiales bituminosos constituyen una extensa gama de productos que tienen en común su aspecto, color y poder aglomerante, formados por una mezcla muy compleja de hidrocarburos de distintos tipos. Los ingenieros conocían desde hace muchos siglos las magníficas propiedades adhesivas y la buena durabilidad que poseía este material y así, no es de extrañar que, 3800 años a. C., los habitantes de Mesopotamia y del valle del Indo emplearan el betún natural como material aglomerante en albañilería, en la construcción de caminos y como impermeabilizante de estanques y depósitos de agua. En la protección de un embarcadero de piedra en el Tigris se empleó betún natural mezclado con arena y grava. En Egipto se emplearon los betunes para silos, cisternas, momificación, así como en sus pirámides.

Su empleo en la construcción de las carreteras modernas se remonta a los primeros años del siglo XIX. En Francia en 1802 se emplean por primera vez rocas asfálticas para la construcción de carreteras, pavimentos de puentes y aceras. En 1859 se perfora el primer pozo de petróleo y en 1870 se construye en Newark, N. Jersey (EEUU), el primer pavimento asfáltico. En 1902 en EEUU se obtuvieron 20.000 toneladas de asfalto procedente de la destilación del petróleo para la pavimentación de carreteras.

Los primeros productos que se emplearon fueron betunes naturales pero en la actualidad el uso que se hace de éstos es muy reducido y la casi práctica totalidad de los productos bituminosos empleados en la construcción procede de la destilación del petróleo.

La industria de los productos bituminosos está cada día más desarrollada, los materiales que se producen son cada vez más completos y sus características más acordes con las exigencias constructivas, como ocurre en el campo de los aglomerantes para carreteras. El empleo de activantes aniónicos y catiónicos, de adiciones de caucho, resinas sintéticas, fibras, polímeros, etc. han hecho posible que se obtengan productos de gran adherencia a los áridos, capaces de resistir las grandes cargas que transmite el tráfico pesado en carreteras.

En la actualidad, la gama existente de productos bituminosos es muy amplia como también lo son las aplicaciones que se hacen de ellos, entre las que podemos considerar como principales los firmes de carreteras y las impermeabilizaciones tanto en edificación como en obras hidráulicas.

Dentro de la terminología de materiales bituminosos incluimos todas aquellas sustancias de origen natural o artificial, obtenidas bien por destilación, refinación o cracking de productos naturales, que pueden ser de origen hidrocarbonado o carbonoso, de consistencia sólida, líquida o gaseosa, coloración generalmente oscura, que poseen propiedades aglomerantes.

Consideramos, por consiguiente, materiales bituminosos a toda una serie de compuestos que comprenden a los que tienen su origen tanto en los crudos petrolíferos como en la destilación destructiva de sustancias de origen carbonoso, reservando la palabra "asfáltica" para aquellas sustancias de origen petrolífero, naturales o artificiales, y "alquitranes", a las procedentes de sustancias carbonosas.

Según estos criterios, son "asfálticos" los llamados asfaltos naturales, las rocas asfálticas, las ceras o parafinas naturales, el gas natural, etc., así como todos los productos manufacturados derivados de los petróleos, betunes, betunes fluidificados y emulsiones.

Dentro de la denominación de "alquitranes" se incluyen los alquitranes de hulla, de lignito, de madera, etc., así como sus gases correspondientes, y también las llamadas breas de alquitrán, procedentes de muy variadas sustancias carbonosas.

En la terminología internacional referente a estos materiales se observa una evidente falta de uniformidad, no solamente en las definiciones de bastantes de estos productos, sino incluso en su nomenclatura, fundamentalmente entre los Estados Unidos y los países europeos. Posiblemente el origen de esta confusión sea debido en gran parte a que algunas de estas sustancias se utilizaban ya en estado natural desde muy antiguo como materiales de construcción, aplicándose sus nombres de una forma global y poco precisa a materiales hoy claramente diversificados por su origen o propiedades [93].

En el IV Congreso Mundial de Carreteras celebrado en Milán en 1928, se acordó la creación de un Comité especial para la normalización de la nomenclatura, que publicó por primera vez en 1931 un diccionario en el que ya se recogían una serie de términos y definiciones acordadas internacionalmente, bajo los auspicios de la Asociación Internacional Permanente de Congresos de Carreteras (AIPCR). Desgraciadamente, ni entonces ni hasta la fecha se ha alcanzado una identidad de criterios entre la postura europea, que sigue en general las definiciones dadas por la AIPCR y la terminología norteamericana, influenciada inicialmente por la clasificación de Abraham y en la actualidad por una serie de organismos como ASTM principalmente.

Las principales diferencias en terminología sobre materiales bituminosos se centran fundamentalmente en los términos "betún", "betún asfáltico" y "asfalto", como más importantes.

La literatura americana (ASTM D8 - 73), define al betún como una "sustancia aglomerante de coloración oscura o negra, consistencia sólida o semisólida, natural o manufacturada y compuesta fundamentalmente por hidrocarburos de elevado peso molecular, encontrándose entre sus componentes más típicos los asfaltos, alquitranes,

breas, etc.". Dentro de la nomenclatura europea, el término análogo es el de ligante bituminoso, definido por la AIPCR (1974) como "betún o alquitrán cuya fluidez permite su empleo en la construcción de carreteras".

En los países que siguen la terminología de la AIPCR se conoce bajo la denominación de betún asfáltico a los "productos bituminosos sólidos o muy viscosos, naturales o preparados a partir de hidrocarburos naturales, con bajo porcentaje de productos volátiles, que poseen propiedades aglomerantes y son esenciales solubles en sulfuro de carbono". En la terminología americana no existe este vocablo, que se sustituye por la expresión "asphalt cement", definido según ASTM como "asfalto puro o mezclado con un material bituminoso, especialmente preparado para su empleo directo en pavimentaciones y teniendo una penetración en condiciones normalizadas entre 5 y 300".

Finalmente, acerca de los significados de la expresión asfalto, la AIPCR no lo define en la última edición de su diccionario (aunque sí recoge el término), pero en anteriores ediciones (1963) lo definía como una "mezcla natural o artificial de un betún con materias minerales inertes finas en proporciones importantes". Para la ASTM es un "material aglomerante oscuro o negro, compuesto fundamentalmente por betún y que puede existir en la naturaleza o ser obtenido a partir del petróleo". Si bien ambas definiciones no parecen ser aclaratorias del todo, parece sin embargo que la AIPCR reserva este término fundamentalmente para algunos productos naturales, mientras que la acepción americana, mucho más amplia, al no hacer explícita mención a la existencia o no de material mineral, englobaría a una amplia gama de sustancias, tanto naturales como procedentes del petróleo.

2. ALQUITRANES

Los alquitranes son productos bituminosos semisólidos o líquidos que se obtienen como residuo de la destilación, en ausencia de aire, de sustancias orgánicas que posean materias volátiles, fundamentalmente, hulla, lignito o madera.

Las breas son productos bituminosos fusibles sólidos o semisólidos preparados a partir de la evaporación parcial o destilación fraccionada de alquitrán o de sus derivados. La palabra brea debe ir seguida del nombre del alquitrán de origen.

El alquitrán más empleado en construcción es el de hulla obtenido como subproducto en las fábricas de gas ciudad y en los hornos de cok metalúrgico. El carbón de hulla se calienta en cámaras cerradas a temperaturas superiores a los 800 °C extrayéndose las materias volátiles ricas en hidrocarburos, parte de las cuales se extraen directamente, mientras que otras se llevan a un condensador y a un extractor. El alquitrán se obtiene en una gran parte en los conductos y en cantidad más reducida en el condensador y en el extractor.

La cantidad de alquitrán obtenida depende de la composición del carbón de hulla y del proceso seguido de obtención, no siendo por consiguiente la misma en el caso de proceder de las plantas de cok o de las de gas ciudad.

Con cualquiera de las dos procedencias, los alquitranes de hulla resultantes se denominan "alquitranes brutos" y no se emplean en carreteras por ser poco viscosos, no tener suficiente poder aglomerante y poseer otros productos valiosos para la industria, no necesarios para su aplicación en pavimentos, de aquí que estos alquitranes brutos se sometan a una destilación fraccionada en hornos tubulares en los que primero se elimina el agua que poseen a 100 °C, los aceites ligeros a temperatura inferior a 170 °C, los aceites fenólicos entre 170 y 205 °C, los aceites medios entre 205 y 240 °C, los aceites lavados entre 240 y 280°C, los aceites de antraceno y las breas entre 270 y 340 °C. Las breas se mezclan con algunos de los aceites destilados, según sea el tipo de alquitrán deseado, obteniéndose los "alquitranes reconstituidos".

Los alquitranes son sistemas coloidales de tipo sol formados por un conjunto de micelas de pesos moleculares altos que dan lugar a la fase discontinua y un medio aceitoso, constituido por hidrocarburos de peso molecular inferior, que rodean a estas micelas. La viscosidad del alquitrán depende del número y tamaño de las micelas existentes.

Por razones de tipo económico, los alquitranes encuentran amplio empleo en países que no poseen petróleo y sin embargo tienen minas de carbón.

El problema que presentan los alquitranes es el del envejecimiento o endurecimiento de los mismos cuando están expuestos a las condiciones atmosféricas. Cuando los alquitranes se han obtenido por procesos a altas temperaturas, como ocurre en los hornos de cok, el envejecimiento se produce principalmente por oxidación, mientras que si se ha obtenido por procesos a temperaturas bajas, como ocurre en las retortas verticales, se produce el endurecimiento por evaporación de los aceites ligeros que contienen. Cualquiera que sea el origen del envejecimiento, éste se manifiesta en un endurecimiento superficial, no quedando afectado el material situado debajo de la capa superficial salvo en el caso en que ésta se agriete por falta de flexibilidad o desaparezca debido a su fragilización.

Las especificaciones españolas contemplan dos tipos de alquitranes, AQ y BQ, según los tipos de aceites y breas que intervienen en su composición. Los del tipo AQ contienen una breas más dura y unos aceites más volátiles que los del tipo BQ. Estos tipos se dividen a su vez en otros dos y tres subtipos respectivamente, según la viscosidad de los mismos y su composición (por ejemplo, AQ-38 ó BQ-62, indicando el número la denominada temperatura de equiviscosidad).

Los alquitranes pueden mejorarse polimerizándolos con algunas resinas sintéticas tales como el cloruro de polivinilo, resinas epoxi, resinas de poliéster, etc. De esta forma pueden conseguirse mezclas con un mejor comportamiento reológico, y mayor resistencia al envejecimiento.

3. MATERIALES ASFALTICOS

Atendiendo a su procedencia, y de forma quizá algo simplificada, los materiales asfálticos pueden clasificarse en dos grandes grupos: productos naturales y productos manufacturados.

Entre los primeros tenemos principalmente los asfaltos naturales y las rocas asfálticas, y entre los segundos, los más importantes en la técnica de pavimentación, son los betunes asfálticos, los betunes fluidificados y las emulsiones.

3.1 LIGANTES ASFALTICOS NATURALES

Con la denominación de asfaltos naturales o nativos, se conocen a una amplia gama de productos con base asfáltica que existen en la naturaleza y de los que pueden obtenerse, sin necesidad de destilación, aglomerantes para pavimentaciones.

Se han formado por un fenómeno de migración de determinados petróleos naturales hacia la superficie terrestre, a través de fisuras y rocas porosas, seguido o combinado con una volatización de sus componentes más ligeros y la consiguiente concentración de los compuestos asfálticos ya existentes en el mismo; algunos se encuentran en estado bastante puro, formados casi exclusivamente por sustancias hidrocarbonadas con poca materia mineral, aunque lo más usual es que estén mezclados con sustancias minerales en mayor o menor proporción.

De entre los asfaltos naturales que pudiéramos considerar de mayor pureza, el más importante por su cuantía se encuentra en los Estados Unidos, en el estado de Utah, y se conoce con el nombre de "gilsonita", palabra derivada del nombre de la persona que inició su explotación comercial. La masa asfáltica se encuentra a lo largo de una serie de vetas más o menos verticales y con espesores variables, desde pocos centímetros hasta algunos metros; su riqueza asfáltica, aunque es variable de unas zonas a otras, suele estar entre un 90 al 95% de un betún de extraordinaria dureza, con una penetración comprendida entre 0 y 3 unidades solamente.

El llamado asfalto Trinidad, en el lago de la isla Trinidad, cerca de la costa de Venezuela, constituye el mayor depósito natural conocido de este material y también el de mayor importancia comercial. La masa asfáltica, en forma de cono invertido y con una superficie de casi 0,5 Km², se explota directamente a cielo abierto, obteniéndose un

producto bruto con un 54% aproximadamente de betún, siendo el resto agua y materia mineral; una vez purificado, el material resultante, llamado "Trinidad Epuré", posee una extraordinaria aceptación en todo el mundo como excelente material para la construcción; mezclado con betunes procedentes de la destilación del petróleo se utiliza en firmes especiales, a los que confiere unas calidades de resistencia y durabilidad excepcionales.

Entre los materiales naturales con menor riqueza asfáltica tenemos las llamadas rocas asfálticas, consistentes fundamentalmente en calizas impregnadas con material bituminoso. Son principalmente abundantes en la Europa continental, explotándose en numerosos países como Francia, Italia, Suiza, Alemania y también España. En nuestro país destacan los depósitos de Maeztu (Alava), en los que la masa bituminosa se encuentra impregnando calizas y cuarcitas cristalinas. Su riqueza en betún varía bastante de unas zonas a otras, aunque suele estar entre un 10 a un 15%.

3.2 PRODUCTOS DE DESTILACION DEL PETROLEO

Entre los productos manufacturados procedentes de la destilación del petróleo se distinguen los betunes asfálticos, los betunes fluidificados y las emulsiones.

3.2.1 Betunes asfálticos

Desde el punto de vista de su naturaleza química, los betunes asfálticos son mezclas muy complejas de hidrocarburos, solubles en sulfuro de carbono, que contienen en sus moléculas además azufre, oxígeno, nitrógeno, compuestos metálicos, etc., obtenidos como subproducto en el refinado de los petróleos.

En la tabla 2.1 se muestran a título de ejemplo los elementos químicos presentes en betunes de distinta procedencia [134]. Podría pensarse que los betunes obtenidos a partir de esos crudos son muy similares, pudiendo esperar también comportamientos muy parecidos. Pero en realidad, betunes con valores muy similares de carbono e hidrógeno presentan comportamientos muy diferentes, debido a la amplia variación en

la concentración del resto de los elementos presentes que, a pesar de encontrarse en una proporción mínima, confieren diferentes características reológicas y dan polaridad a las moléculas, por lo que tienen una gran importancia en las propiedades del betún. Por otra parte, los valores medios de carbono e hidrógeno dan muy poca información sobre la forma en que están incorporados los átomos en las moléculas y el tipo de estructuras moleculares que se encuentran presentes.

Tabla 2.1 Elementos químicos presentes en betunes de distinta procedencia (Tallafigo, 1991)

ELEMENTO	PROCEDENCIA DEL BETUN			
	Méjico	Boscan	California	Arkansas
Carbono (%)	83,77	82,90	86,77	85,78
Hidrógeno (%)	9,91	10,45	10,34	10,19
Nitrógeno (%)	0,28	0,78	1,10	0,26
Azufre (%)	5,25	5,43	0,99	3,41
Oxígeno (%)	0,77	0,29	0,20	0,36
Vanadio (ppm)	180	1380	4	7
Níquel (ppm)	22	109	6	0,4

Los petróleos que se encuentran en la naturaleza pueden ser [45]:

- a) Parafínicos, formados principalmente por hidrocarburos de la serie parafínica C_nH_{2n+2} ; contienen, además, una cantidad relativamente reducida de hidrocarburos nafténicos C_nH_{2n} y C_nH_{2n-2} . Químicamente estos hidrocarburos son estables y los productos que forman tienen un gran valor comercial; pero los residuos asfálticos que de ellos se obtienen son de poco poder adhesivo y bastante susceptibilidad a los cambios de temperatura, y por ello no es

recomendable su empleo para firmes si no se adoptan medidas especiales en el proceso de destilación o se les da un tratamiento posterior. Los asfaltos de origen parafínico son excelentes como impermeabilizantes y sin tratamiento especial pueden emplearse en pavimentos como fundentes y en tratamientos superficiales ligeros.

- b) Asfálticos, formados principalmente por hidrocarburos de la serie nafténica C_nH_{2n} , C_nH_{2n-4} , o ciclo parafinas que tienen como núcleo de su molécula los anillos de cinco o seis átomos de carbono y ciclopentano, ciclohexano.

Junto a ellos, o combinados, se encuentran hidrocarburos de la serie aromática y parafínica. Los hidrocarburos de la serie aromática poseen en su molécula el agrupamiento del anillo bencénico C_6H_6 .

De estos núcleos se derivan, por unión de cadenas laterales, condensación de anillos o unión a través de cadenas, todos los demás compuestos. Normalmente, los petróleos asfálticos tienen un elevado peso específico y producen como residuo de la destilación gran cantidad de productos semisólidos muy semejantes a los asfaltos naturales desde el punto de vista físico y químico; estos residuos tienen un gran poder aglomerante y aunque no son tan estables como los obtenidos de los petróleos parafínicos, son los más apropiados para su empleo en la construcción de firmes.

- c) Semiasfálticos son aquellos petróleos que ocupan una posición intermedia entre los dos anteriores; los productos asfálticos obtenidos de ellos se emplean en la construcción de pavimentos, para cuyo uso serán más o menos apropiados según la preponderancia en su constitución de los dos tipos analizados en los dos primeros epígrafes.

Las propiedades de los productos asfálticos industriales dependen, por tanto, del petróleo origen; pero no es solamente el crudo la causa de residuos diferentes: tiene también una gran importancia el proceso de fabricación.

La obtención de los betunes a partir del petróleo se realiza sometiendo al mismo, después de una destilación fraccionada a presión atmosférica en la que se recogen éteres y aceites ligeros, a otro proceso de destilación fraccionada en caliente y vacío para obtener aceites pesados y grasas. La temperatura a la cual se desarrolla el proceso es baja, inferior a 400 °C, y el tiempo de calentamiento es corto; con ambas circunstancias se evitan o disminuyen los fenómenos de descomposición térmica -cracking-, que se origina con temperaturas más altas.

En el proceso de destilación fraccionada se produce una separación selectiva de los diferentes componentes del petróleo de acuerdo con su punto de ebullición. Mediante calentamiento a diferentes temperaturas y condensación de los vapores producidos van obteniéndose las fracciones de éter, gasolina, querosenos, gasóleos, aceites lubricantes, fuel-oil y residuos asfálticos, según se indica en la figura 2.1. Los residuos asfálticos son la fracción densa de la destilación y están formados en una gran proporción por betún asfáltico cuyo parecido con el betún natural es muy grande. Este betún es de gran aplicación en pavimentos de carreteras por sus buenas cualidades. Dependiendo de la temperatura, grado de vacío y velocidad de la destilación, pueden obtenerse diferentes variedades de betún; sin embargo, lo normal es que las plantas obtengan dos tipos extremos, uno blando y otro duro, y que mediante mezcla posterior de ambos en diferentes proporciones se consiga toda la gama de betunes que contemplan las normas y que son aptos para su aplicación en pavimentos.

Existe otro procedimiento de extracción en el cual se efectúa la separación en dos fases líquidas, en vez de una líquida y otra gaseosa, en el que se emplean disolventes para extraer el residuo, corrientemente hidrocarburos de bajo peso molecular (propano y butano); este proceso recibe el nombre de precipitación o desasfaltado. En los betunes así obtenidos existe una alta proporción de productos aromáticos y menor de parafínicos, y son más frágiles que los obtenidos en otros procesos.

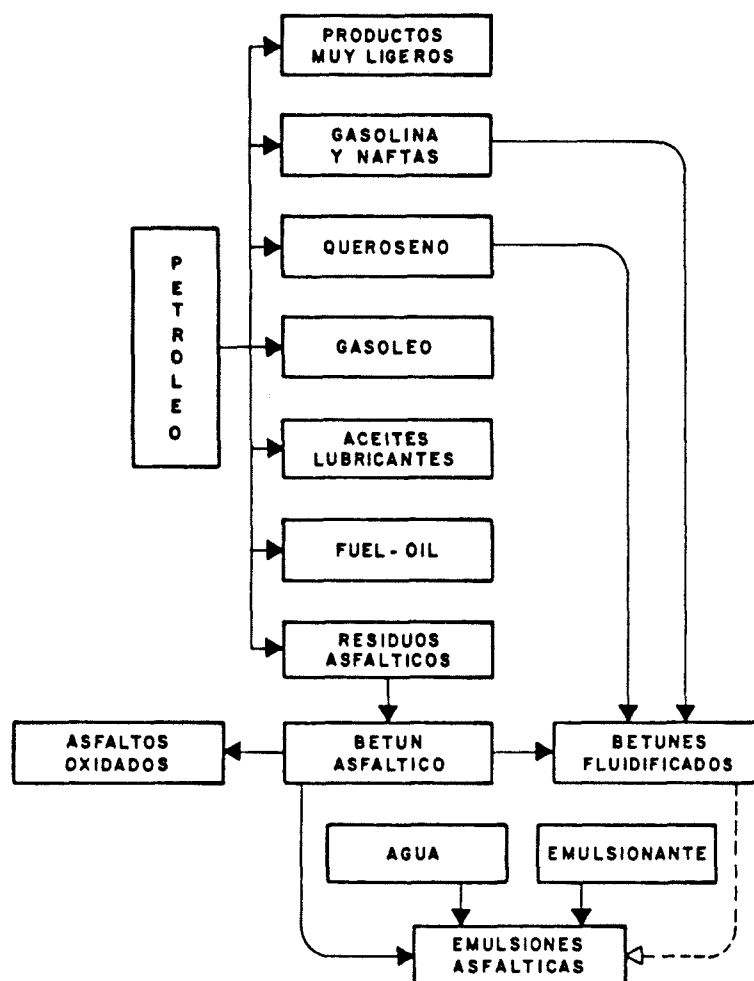


Figura 2.1 Obtención de productos bituminosos

El betún asfáltico obtenido por destilación fraccionada puede someterse a un proceso de oxidación por soplado mediante el cual se elimina el agua y el anhídrido carbónico que posee, a la vez que se produce una polimerización del producto. El soplado se realiza con aire calentado a unos 200 °C y durante un tiempo que oscila entre las 5 y las 12 horas dependiendo de la calidad asfáltica del crudo del que se obtuvo el betún. Este tipo de betunes oxidados no se emplean en pavimentos debido a que son poco dúctiles; sin embargo son materiales idóneos para aplicarlos en láminas impermeabilizantes debido a la gran resistencia que presentan a la acción de los agentes atmosféricos.

En los últimos años, la crisis energética y el encarecimiento de los crudos del petróleo han llevado a las refinerías a incrementar el aprovechamiento de los residuos de los procesos de destilación. Un medio para conseguirlo es la utilización del denominado cracking catalítico de lecho fluidizado. El cracking permite romper cadenas de crudos semipesados para obtener mayor cantidad de gasolinas mediante un tratamiento a alta temperatura y presión. Como subproducto se obtienen betunes baratos pero de baja calidad que envejecen con rapidez al ser ricos en carboídes y carbenos. Estos betunes prácticamente no se emplean en la construcción de pavimentos.

Dentro de la amplia variedad de grupos químicos que entran en su composición, pueden considerarse, según casi todos los autores, a los compuestos que forman los betunes como pertenecientes a uno o más de los cuatro grupos siguientes:

- Alifáticos saturados, o parafinas,
- alifáticos con dobles enlaces olefínicos,
- nafténicos, o cicloparafinas, y
- grupos con anillos aromáticos.

Aunque compuestos que contengan hidrocarburos alifáticos no saturados no suelen estar presentes en los betunes de destilación directa, si pueden formarse en procesos de crackización. Las distintas proporciones en que entran en la composición de un betún asfáltico algunos de estos cuatro grupos varía con los crudos de partida y tienen una marcada influencia en las características y propiedades del ligante final, por lo que no todos los petróleos son igualmente adecuados para la producción de estos productos; en general, como se ha dicho, suelen ser preferibles los crudos ricos en aromáticos y nafténicos.

Desde el punto de vista físico, los betunes asfálticos forman un sistema coloidal, lo que condiciona sus características reológicas y permite su adaptación a una amplia variedad de usos. En este sistema coloidal la fase dispersa -micelas- está constituida por las partículas más pesadas, asfaltenos, mientras que la fase continua es

un medio fluido aceitoso formado por los componentes más ligeros, maltenos. Los ácidos asfálticos libres y las resinas asfálticas son compuestos del medio aceitoso que actúan como coloides protectores y mantienen la estabilidad del sistema coloidal.

Los asfaltenos podemos considerarlos constituidos por un núcleo formado por los compuestos más complicados y de mayor peso molecular, al cual se han incorporado, por absorción, otros compuestos, las resinas y los ácidos asfálticos, estableciendo una ordenación de mayor a menor peso molecular y naturaleza más aromática desde el centro a la periferia. Con ello se produce una distribución espacial alrededor del núcleo, que va disminuyendo de densidad hasta llegar, casi insensiblemente, a la fase continua, los maltenos.

Los maltenos están constituidos por mezcla de hidrocarburos cíclicos, saturados o no, que contienen, si existe, la totalidad de la parafina del betún; no tienen, por sí, poder aglomerante, pero desempeñan una función fundamental en el conjunto como elemento peptizante de la solución coloidal; es decir, que son el líquido que mantiene en disolución parcial el sólido -los asfaltenos en este caso- sin llegar normalmente a lograr la total solución, esto es, a separar las moléculas. En esta función de los maltenos influye decisivamente la cantidad de productos aromáticos que contienen: su proporción tiene que ser suficiente, según la de asfaltenos, para que la solución coloidal sea estable y no haya tendencia a la gelificación.

Tanto la composición como las propiedades de ambas fracciones tienen una marcada relación con el comportamiento y propiedades de los betunes. Dependiendo del grado de aromaticidad de los maltenos y de la concentración de los asfaltenos, la estructura coloidal de los betunes puede ser del tipo "sol" -movimiento libre de las micelas- o del tipo "gel" -estructura micelar empaquetada-, siendo este estado coloidal del sistema el que condiciona el comportamiento reológico del betún.

Así pues, según el contenido de asfaltenos cabe distinguir dos tipos distintos de betunes asfálticos:

- a) Tipo sol: son los que tienen una menor proporción de asfaltenos y resinas, que se encuentran agrupados en cadenas homogéneas perfectamente dispersas en el medio aceitoso formado por los maltenos. Poseen un comportamiento reológico fundamentalmente newtoniano y, por tanto, una gran susceptibilidad a las variaciones de temperatura. Son poco apropiados para soportar las sollicitaciones que originan las deformaciones plásticas cuando se utilizan como ligante de una mezcla bituminosa.

- b) Tipo gel: tienen una mayor proporción de asfaltenos y resinas, que se disponen formando una estructura reticular muy compleja, dejando unos espacios libres, en los que se encuentran los maltenos. La estructura de este tipo de betunes es similar a una "esponja" formada por los asfaltenos y las resinas, ocupando los "poros" la fracción de maltenos. El comportamiento reológico es mucho más complejo que en el caso de los betunes tipo sol, aproximándose al de un sólido visco-elástico no lineal. Es, por tanto, menos susceptible a la temperatura y más adecuado para soportar las sollicitaciones que producen las deformaciones plásticas.

Los betunes asfálticos que normalmente se emplean, denominados betunes de penetración por ser la penetración en décimas de milímetro de una aguja normalizada a 25 °C la que sirve para clasificarlos de manera elemental, están comprendidos entre los dos tipos de estructuras anteriormente descritas. Al aumentar la proporción de asfaltenos se produce un acercamiento del tipo sol al tipo gel, que se corresponde con un alto índice de penetración y baja susceptibilidad térmica, aumentando la resistencia del betún a los agentes químicos.

Se comprende fácilmente la importancia que tiene el tipo de suspensión coloidal en las propiedades constructivas. Pero hay que tener en cuenta que la constitución de las micelas y la viscosidad o consistencia del betún se altera con la temperatura: al elevarse ésta, parte de los componentes, las resinas y compuestos más aromáticos que rodean la micela, pasan a la fase continua, disminuye la viscosidad y, por tanto, las propiedades físicas del producto -resistencia y deformabilidad-, cambian.

Esta propiedad es de gran utilidad en la construcción. Para que el betún resista con un mínimo de deformación a la acción de las cargas del tráfico y las deformaciones no sean plásticas, sino elásticas, es preciso emplear betunes de alta consistencia. Pero su aplicación en obra exige una baja viscosidad para que el producto pueda mojar bien la piedra y adherirse a ésta con la máxima efectividad; ello obliga a calentar el betún hasta una cierta temperatura, alterando el equilibrio coloidal sólo en tal medida que sea posible volver al primitivo estado de consistencia cuando el betún enfríe. Pero además, el equilibrio coloidal que da resistencia adecuada al betún una vez frío, no debe alterarse por cambios de temperatura cuando el firme quede abierto al tráfico, pues entonces éste resultará plástico y se deformará sin recuperación total bajo la acción de las cargas del tráfico, por no tener el betún la suficiente rigidez.

Por otra parte, una consistencia del betún demasiado elevada puede hacerlo rígido y frágil si la temperatura ambiente desciende excesivamente: el betún puede agrietarse. Por tanto, la susceptibilidad del betún a los cambios de temperatura debe vigilarse estrechamente.

Los betunes tienen una gran durabilidad frente a la acción agresiva de los agentes naturales, tendiendo únicamente a oxidarse cuando están expuestos al aire, calor y rayos ultravioletas, aunque esta oxidación se realiza mucho más lentamente que en los alquitranes. Debido a que la oxidación es un fenómeno superficial sus efectos son tanto más perjudiciales cuanto más delgada es la capa de betún que se ha aplicado.

En las actuales especificaciones españolas, de los siete tipos de betunes anteriormente admitidos y que cubrían la gama continua de penetraciones desde 30 a 300, se especifican ahora únicamente seis tipos, con la variación sobre los anteriores de restringir a 10 unidades de penetración solamente los intervalos anteriores de 20 unidades, introduciendo así zonas de discontinuidad en las penetraciones exigidas a los nuevos tipos. Estos han sido los siguientes: B-20/30, B-40/50, B-60/70, B-80/100, B-150/200 y B-200/300, definidos igualmente por las penetraciones mínima/máxima. Entre las novedades está la inclusión de un tipo más duro, el B-20/30, así como la supresión, por su escasa utilización práctica, del tipo B-100/150.

3.2.2 Betunes fluidificados

Como ya se ha indicado, el betún asfáltico o betún de penetración presenta el inconveniente de tener que calentarlo a elevadas temperaturas para poder utilizarlo en obra debido a su gran viscosidad. Los betunes fluidificados tratan de evitar este inconveniente al mezclar el betún asfáltico con disolventes volátiles hidrocarbonados compatibles con él, con el fin de impedir la precipitación de los asfaltenos.

Los disolventes empleados son fracciones más ligeras obtenidas en la destilación fraccionada del mismo petróleo, tales como la gasolina, queroseno, etc., aunque también pueden utilizarse aceites ligeros o medios procedentes de la destilación de la hulla. Estos disolventes o fluidificantes tienen como misión principal disminuir la viscosidad para favorecer la puesta en obra dado que posteriormente se eliminan durante el proceso de curado dando lugar al betún asfáltico de partida. Es preciso tener en cuenta que en la eliminación, generalmente por evaporación, del disolvente se está perdiendo un producto de valor nada despreciable y que además produce una contaminación atmosférica, así como riesgos de inflamación por el carácter de los fluidificantes empleados. A los betunes así obtenidos se les denomina "cut-backs" o simplemente betunes fluidificados.

A fin de abaratar los betunes fluidificados se ha llegado a sustituir, en algunas aplicaciones muy concretas, los disolventes procedentes del petróleo por fluidificantes (fluxantes en este caso) procedentes de la destilación de la hulla dando lugar a los betunes fluxados. Químicamente, los aceites de alquitrán empleados como disolventes son hidrocarburos cíclicos no saturados, generalmente de la serie aromática o bencénica, y corresponden a fracciones de destilación o mezclas de éstas, más amplias (100 - 360 °C) que las de los disolventes derivados del petróleo (160 - 230 °C).

Como anteriormente se ha indicado, durante el proceso de curado los disolventes que contienen los betunes fluidificados se evaporan. La velocidad de evaporación está influenciada por el tipo de disolvente empleado, por la temperatura

ambiente, por la velocidad del aire y por la superficie del ligante en contacto con el ambiente. La pérdida de disolvente no es nunca total, con lo cual el producto que queda después del curado posee siempre una penetración superior a la del betún origen. La eliminación total del disolvente solo puede realizarse mediante destilación.

Para la identificación, tanto del disolvente como del betún residual, es fundamental el ensayo de destilación fraccionada. En esencia, este ensayo, consiste en destilar una muestra a una velocidad determinada, midiendo los volúmenes de destilación obtenidos a las temperaturas que se especifican. El residuo que queda después de haber alcanzado una temperatura de 360 °C se considera betún residual, con el que se pueden efectuar los ensayos propios de los betunes de penetración y comprobar si tienen las características deseadas. Lo mismo sucede con el fluidificante obtenido, el cual, mediante los ensayos correspondientes, se comprueba si reúne las condiciones adecuadas.

Las especificaciones españolas establecen dos tipos de betunes fluidificados en función de la velocidad de curado: FR (curado rápido) y FM (curado medio). Los de curado lento, llamados en la terminología internacional "road oils" no tienen aplicación actual en pavimentaciones, por lo que sus características no están recogidas en el Pliego de condiciones.

Los del tipo FR son betunes fluidificados con naftas o gasolinas muy volátiles y betunes base con una penetración a 25 °C entre 70 y 100, con objeto de conseguir una penetración final en el betún residual comprendida entre 80 y 120, y los del tipo FM son betunes fluidificados con petróleo o queroseno y betunes base con penetraciones comprendidas entre 70 y 250, para obtener una vez curados betunes residuales con penetraciones entre 120 y 300, algo más de margen que el exigido en los tipos FR por la evaporación más lenta del disolvente.

Dentro de cada uno de los dos tipos citados hay tres subtipos con proporciones decrecientes de fluidificante y viscosidad creciente: FR 100, FR 150 y FR 200; FM 100, FM 150 y FM 200. Los tipos 100 tienen hasta el 50% de fluidificantes y los

del tipo 200 solamente el 17%. Todos los betunes fluidificados identificados por igual número tienen una viscosidad análoga, con independencia de sus características de curado.

Los betunes fluidificados se suelen activar añadiéndoles productos tensoactivos, tales como jabones calizos o activantes catiónicos a base de sales de amonio cuaternario, que tienen como misión disminuir la tensión interfacial entre el ligante y el árido, facilitando la envuelta de éste por el primero y el desplazamiento del agua a la vez que se mejora la adherencia del ligante con la piedra. En el caso de los betunes fluidificados el empleo de activantes es mucho más aconsejable que en el caso de betunes asfálticos debido a que en los primeros se trabaja a temperaturas moderadas o bajas que no alteran las características del activador, mientras que en los segundos se trabaja, en general, a temperaturas elevadas que hacen perder la efectividad del activante por destrucción de sus moléculas. En cualquier caso, la activación del betún debe realizarse momentos antes de proceder a la aplicación del mismo.

Los betunes fluidificados se han venido empleando habitualmente en tratamientos superficiales, mezclas abiertas, riegos de imprimación, tratamientos por penetración, etc. Desde 1974, como consecuencia de la crisis del petróleo y sus efectos económicos y energéticos, se sigue una política de restricción en el empleo de los betunes fluidificados y a favor de las emulsiones bituminosas. Actualmente en España, los betunes fluidificados tienen un consumo que no llega al 2% del total de los ligantes asfálticos.

3.2.3 Emulsiones bituminosas

Con objeto de facilitar la puesta en obra del betún disminuyendo su viscosidad y poder aplicarlo en tiempo lluvioso, con áridos húmedos e incluso con bajas temperaturas, sin los inconvenientes de los betunes fluidificados, se recurre a las emulsiones bituminosas.

Como se sabe, una emulsión está formada por la dispersión homogénea de un líquido en forma de gotas de pequeñas dimensiones dentro de otro que no es miscible con el primero. El conjunto de estas pequeñas gotas constituye la llamada fase dispersa o discontinua, mientras que el medio en el cual están dispersas aquéllas se denomina fase continua o dispersante.

Las emulsiones bituminosas son dispersiones coloidales de betún asfáltico puro o algo fluidificado en agua. La fase dispersa está constituida por partículas de betún de 3 a 8 micras de diámetro, y la fase continua es el agua. Con diámetros mayores, la dispersión es muy grosera y tiende a sedimentar; con diámetros menores la estabilidad es muy alta ya que empieza a manifestarse el movimiento browniano de las partículas.

En la fase dispersa, las partículas de betún adquieren forma esférica, debido a la existencia de una tensión interfacial que actúa en el sentido de reducir al mínimo la superficie de separación de ambas fases. Por esta razón, cada vez que dos glóbulos de betún entran en contacto se sueldan, originando otro de mayor tamaño y menor superficie, por lo que el sistema evoluciona normalmente hacia la superficie de separación mínima, o sea, hacia la separación completa de ambas fases, betún y agua. En otras palabras, tan pronto como se deje la emulsión en reposo, las partículas dispersas empezarán a unirse haciéndose cada vez más grandes hasta que se produce la separación del betún y del agua, diciéndose, en este caso, que la emulsión "ha roto", figura 2.2.



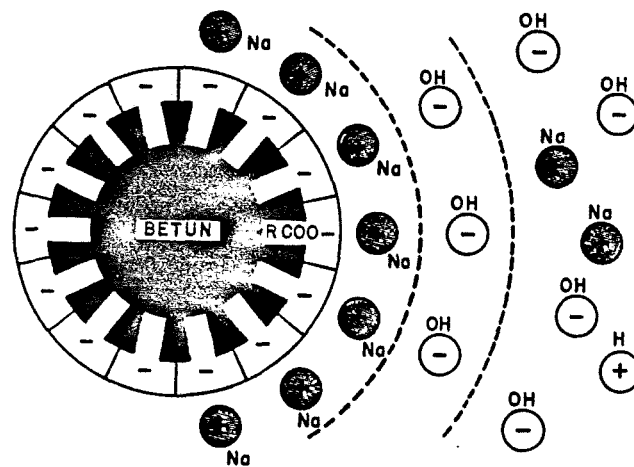
Figura 2.2 Rotura de una emulsión

Para conseguir la estabilidad de la emulsión, evitando esta separación, es preciso adicionar un tercer producto, denominado emulsionante o emulgente, que al rodear a las partículas de betún impide sus sucesivas uniones. La función del emulsionante no es sólo la de evitar la rotura de la emulsión, al cargar electricamente las partículas con una misma polaridad -acción estabilizante-, sino que actúan simultáneamente como sustancias hipotensoras capaces de disminuir la tensión interfacial, facilitando la dispersión de las partículas de betún -acción emulsionante-, mejorando además la adhesividad con los áridos y aumentando la resistencia al desplazamiento por el agua tras la puesta en obra.

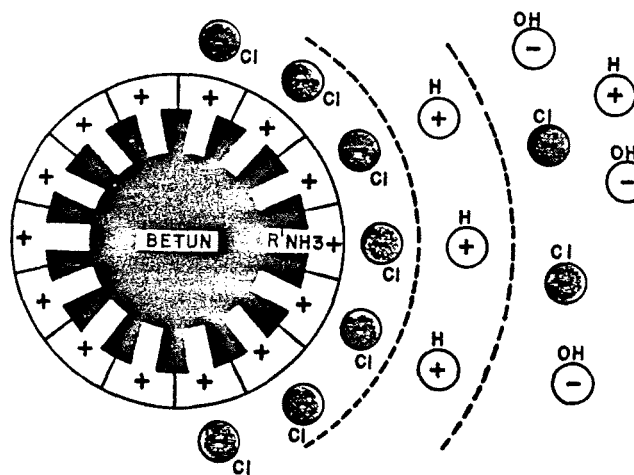
La estabilidad que confiere a la emulsión la molécula de emulsionante se debe a una configuración especial de la misma, denominada polar-apolar. Una molécula se llama apolar cuando los centros de gravedad de sus cargas positiva y negativa coinciden, y se denomina polar cuando no coinciden, siendo entonces la molécula un dipolo, o diciendo igualmente que está polarizada. El betún asfáltico es una sustancia claramente apolar, mientras que la molécula de agua es un típico ejemplo de sustancia polar.

La molécula de emulsionante posee una configuración especial que la hace compatible con un sistema en el que coexistan sustancias polares y apolares, como el formado por el betún y el agua. Esta configuración la forman una "cola" hidrocarbonada y con afinidad, por consiguiente, por el betún y una "cabeza" en su otro extremo de naturaleza polar, compatible y atraída por el agua. Se comprende entonces que al estar sustancias de este tipo presentes en la emulsión, sus partes hidrocarbonadas son atraídas y fijadas sobre los glóbulos de betún, mientras que sus partes polares se orientan hacia el agua. Los glóbulos de betún aparecen así recubiertos por el emulsionante, en una configuración que se suele denominar de "erizo". Como la parte polar de los emulsionantes está formada por electrolitos, se disocian en presencia del agua, lo que finalmente origina que los glóbulos de betún queden eléctricamente cargados; al ser estas cargas de igual signo, su repulsión electrostática es lo que confiere la estabilidad al sistema.

Las emulsiones pueden dividirse, dependiendo de la polaridad que el emulsionante proporcione a las partículas de betún, en dos grupos: aniónicas o básicas (con un pH mayor de 7) y catiónicas o ácidas (con un pH inferior a 7), figura 2.3.



EMULSION ANIONICA



EMULSION CATIONICA

Figura 2.3 Tipos de emulsiones

En las emulsiones aniónicas las partículas de asfalto se cargan negativamente presentando por consiguiente afinidad por los cuerpos con carga positiva. Los emulsionantes que confieren esta polaridad son generalmente oleatos o resinatos de sosa o de potasa, u otros jabones similares. El estearato sódico es muy empleado con este fin: en agua, se ioniza dando un anión soluble en betún de forma que cada glóbulo de betún se rodea de una película de iones de estearato cargados negativamente con lo cual los glóbulos o partículas tienen a repelerse evitándose la coagulación de las mismas. La cantidad de emulsionante suele estar en función de la estabilidad que se desee posea la emulsión, aunque suele estar, como máximo, alrededor de un 2% en peso de emulsión.

En las emulsiones catiónicas las partículas de asfalto se cargan positivamente presentando por tanto afinidad por los cuerpos de carga negativa. Los emulsionantes que las producen son sales cuaternarias de amonio como el bromuro de cetil trimetil amonio el cual forma un anión de bromo y un catión que es el radical cetil trimetil amonio cargado positivamente que rodea a las partículas de betún y se adhiere con gran facilidad a los áridos que presentan carga débil negativa. Esta carga atrae a las partículas de betún dando lugar en parte a la rotura de la emulsión, que continuará su rotura por evaporación del agua. La proporción de emulsionante suele ser entre un 2 y un 3% en peso de emulsión, también en función de la estabilidad que se desee conferir al sistema.

Las propiedades de unas y otras son diferentes pero conviene destacar la buena adhesividad, aunque selectiva, que suelen presentar las emulsiones frente a los áridos. La explicación parece residir, al menos en parte, además de en la buena cubrición causada por la dispersión de las partículas bituminosas, en atracciones de tipo electrostático entre los glóbulos de betún electricamente cargados y la superficie de los áridos, en los que igualmente existen cargas eléctricas al fracturarse la red cristalina que los forman.

Esta atractiva teoría explica satisfactoriamente la buena adhesividad entre una emulsión aniónica y áridos calizos, de tipo electropositivo; igualmente, la adhesividad

entre las emulsiones catiónicas y los áridos silíceos, de tipo electronegativo, se explicaría según estas hipótesis, así como el fenómeno inverso de deficiente adhesividad entre emulsión aniónica y áridos silíceos.

Sin embargo esta explicación parece incompleta [93], ya que no permite aclarar el hecho cierto de la buena adhesividad que suelen presentar las emulsiones catiónicas frente a una gran diversidad de áridos, tanto de naturaleza silícea como caliza.

Independientemente de que en la práctica la superficie de los áridos no es puramente electropositiva o electronegativa, ya que al no ser especies químicamente puras, de hecho existen cargas eléctricas de ambos signos, aunque una de ellas sea predominante, la explicación quizá más acertada ha sido la dada por Kortüm, según la cual la polaridad de la molécula de agua juega un papel fundamental en este tipo de uniones árido-ligante.

En las emulsiones aniónicas, los pequeños iones sodio o potasio que debidos al proceso de fabricación existen en el medio acuoso atraen, a causa de su pequeño tamaño y por consiguiente elevada polaridad, a las moléculas polares de agua, formándose así alrededor de los iones verdaderas esferas de hidratación, formadas por capas sucesivas de moléculas de agua, que conservan su fuerte polaridad.

En las emulsiones catiónicas, por el contrario, como los iones del medio suelen ser de tamaño mucho mayor, como el cloro, su poca polaridad no atrae moléculas de agua, no formándose, por tanto, esferas de hidratación. Según esta teoría, para las emulsiones aniónicas la unión se realizaría por medio de estas esferas hidratadas y polarizadas, es decir, seguiría siendo válida la hipótesis de uniones electrostáticas, mientras que en las emulsiones catiónicas, al no existir estas macromoléculas hidratadas en la fase acuosa, las partículas bituminosas pueden aproximarse realmente hasta entrar en contacto con la superficie de los áridos, entrando entonces en acción las fuerzas de atracción denominadas de Van der Vaal, fuerzas que poseen mayor efectividad a distancias coloidales.

A favor de esta hipótesis parece estar el hecho de ser este íntimo contacto entre el glóbulo catiónico y la superficie del árido la causa de la rápida rotura en este tipo de emulsiones, mientras que el impedimento acuoso que hace de "colchón" entre los glóbulos de betún y el árido en las emulsiones aniónicas, condiciona su rotura al lento proceso de evaporación.

En la actualidad, sin embargo, se dispone de sustancias retardadoras o reguladoras de la velocidad de rotura, para permitir su empleo en técnicas como la de slurrys; entre estas sustancias se emplean el colesterol, así como alcoholes de elevado peso molecular. Por esto, las emulsiones catiónicas son las más empleadas en carreteras tanto con áridos silíceos como calizos, presentando una gran adherencia con los mismos.

Para fabricar las emulsiones se mezcla el betún en caliente, a unos 100 °C, con el agua a la que previamente se le ha incorporado el agente emulsionante. La mezcla se agita energicamente por medio de agitadores de paletas o bien, y como suele ser más frecuente, en molinos coloidales dentro de los cuales la mezcla se somete a un proceso de corte y se la obliga a pasar a través de ranuras u orificios muy estrechos.

Si las emulsiones están bien realizadas y con componentes adecuados permanecerán durante mucho tiempo estables sin que se produzca la separación de sus componentes; si por el contrario se ha utilizado un agua dura o el emulsionante no es de buena calidad, la emulsión será poco estable.

La estabilidad de una emulsión está condicionada a la estabilidad de la película protectora del emulsionante que envuelve las partículas de betún, lo que a su vez está regido por un equilibrio entre las concentraciones iónicas del medio. Una emulsión debe ser estable durante su almacenamiento, pero debe romper cuando llegue el momento de su aplicación. La estabilidad al almacenamiento permite un mayor o menor tiempo entre la fabricación y el empleo, sin que la emulsión tienda a romper o sedimentarse. Sin embargo, los dos conceptos anteriores de rotura y sedimentación son distintos, ya que la sedimentación, es decir, la variación del contenido de ligante en

distintas zonas del envase, puede producirse sin que las partículas se unan entre sí, siendo por tanto reversible el fenómeno mediante una agitación enérgica. De todas formas, sedimentaciones importantes durante un tiempo prolongado pueden resultar peligrosas.

La rotura de cualquier tipo de emulsión se produce siempre que se altera el equilibrio iónico existente en la fase continua, aunque una buena emulsión debe poseer, sin embargo, una cierta elasticidad en este equilibrio, un cierto margen de seguridad que permita su manipulación, transporte, variaciones de humedad, etc., sin que se produzca la rotura.

Al colocar en obra la emulsión en contacto con los áridos se produce la rotura de la misma, es decir, las partículas de betún se vuelven a juntar formando una película continua que une al árido. No debe confundirse el proceso de rotura de una emulsión con el del curado de un betún fluidificado, si bien cuando la emulsión se ha realizado con un betún fluidificado habrá que considerar los dos procesos.

La rotura de las emulsiones además de producirse por afinidad eléctrica de los glóbulos de betún con los áridos, puede producirse por evaporación de agua, por acción de electrolitos y por acción de bajas temperaturas.

La evaporación de agua de la emulsión produce una mayor concentración en alcali de la fase continua que origina el que el emulsionante deje de ejercer poco a poco su acción, con lo cual las partículas de betún se van uniendo y al final se rompe la emulsión. Este efecto es mucho más rápido en emulsiones catiónicas empleadas con áridos secos que con áridos húmedos, por lo que es conveniente humedecer los áridos.

La adición de algunas sales que se disocian en el agua, tales como el cloruro sódico, puede producir la rotura de la emulsión al neutralizar las cargas eléctricas que rodean a las partículas de betún.

Cuando una emulsión está sometida a temperaturas inferiores a cero grados el agua de la misma se congela. Al descongelarse, la emulsión se rompe total o parcialmente quedando inutilizada para su uso. A veces a temperaturas bajas, por encima de los cero grados, se producen alteraciones de los jabones empleados como emulsionantes, especialmente en los sódicos.

El tiempo de rotura es un factor decisivo en la aplicación en obra de cada tipo de tratamiento, según la resistencia que se quiera obtener en las primeras horas, con vistas a la apertura al tráfico, la compactación, la insensibilidad a la lluvia, etc. Atendiendo a la facilidad de rotura de una emulsión en contacto con los áridos se clasifican en: emulsiones de rotura rápida (R), emulsiones de rotura media (M) y emulsiones de rotura lenta (L).

Así pues, las especificaciones españolas establecen los siguientes tipos de emulsiones:

- EAR 0, EAR 1 y EAR 2: Emulsiones aniónicas de rotura rápida, con contenidos mínimos de betún del 43, 60 y 65% respectivamente. Las EAR 0 pueden tener hasta un 7% de fluidificantes.
- EAM: Emulsiones aniónicas de rotura media, con contenidos mínimos de betún del 57%. Además pueden tener un máximo del 10% de fluidificantes.
- EAL 1 y EAL 2: Emulsiones aniónicas de rotura lenta, con contenidos mínimos de betún del 55 y 60% respectivamente. Las EAL 1 pueden tener un máximo del 8% de fluidificantes.
- ECR 0, ECR 1, ECR 2 y ECR 3: Emulsiones catiónicas de rotura rápida, cuyos contenidos mínimos de betún residual son del 43, 57, 62 y 66% respectivamente. El contenido mínimo de fluidificantes es del 7% en las ECR 0, del 2% en las ECR 3 y del 5% en las otras dos.

- ECM: Emulsiones catiónicas de rotura media, con contenidos mínimos de betún puro del 59% y hasta el 12% de fluidificantes.
- ECL 1 y ECL 2: Emulsiones catiónicas de rotura lenta, con contenidos mínimos de betún del 55 y 57% respectivamente. Las primeras pueden tener un 10% de fluidificantes.

En algunas ocasiones, a las designaciones anteriores se les añade la letra d (por ejemplo: ECL 1d, EAL 2d). Esto indica que el betún residual de la emulsión es más duro de lo habitual, con penetraciones de 60/100 en vez de 130/200.

Por otro lado están especificadas unas emulsiones bituminosas especiales para los riegos de imprimación. Son los tipos EAI y ECI, aniónicas y catiónicas respectivamente. Los contenidos mínimos de betún residual son en ambos casos del 40%, mientras que los contenidos de fluidificantes pueden oscilar entre el 10 y 20%.

Las emulsiones tienen un campo de aplicación muy interesante en carreteras como ligantes en riegos, tratamientos superficiales y mezclas bituminosas en frío, y en los que la adhesividad, velocidad de rotura y viscosidad pueden optimizarse para conseguir las condiciones más adecuadas de aplicación. Pueden emplearse también en aglomerados abiertos que pueden aplicarse en capas finas de rodadura, en capas espesas de base o en bacheos y reparaciones puntuales. Igualmente, pueden emplearse en capas de base, grava-emulsión, y en forma de lechadas compuestas de mezclas densas finas aplicadas en capas de reducido espesor.

3.2.4 Ligantes modificados

Generalmente, las características de los ligantes asfálticos son suficientes para fabricar mezclas bituminosas resistentes a la acción conjunta del tráfico y de los agentes ambientales; sin embargo, en algunas ocasiones, las mezclas bituminosas están sometidas a tan fuertes sollicitaciones, que requieren el uso de betunes con propiedades mecánicas y reológicas mejores que las de los betunes convencionales.

Las propiedades que se desean mejorar con el empleo de betunes especiales dependen de la aplicación final a que se destine la mezcla obtenida. No obstante existen varias características que en casi todos los casos en que se recurre al empleo de estos betunes, se desean mejorar [124]:

- Mayor adhesividad tanto activa (tendencia a mojar y envolver los áridos), como pasiva (resistencia a desplazarse por la acción del agua).
- Mayor resistencia a la deformación plástica.
- Menor susceptibilidad térmica: menor tendencia a fluir a altas temperaturas y menor fragilidad a bajas temperaturas.
- Mayor resistencia al envejecimiento, que se traduce en una mayor durabilidad.
- Mayor ductilidad a bajas temperaturas.
- Mayor elasticidad o rapidez en la recuperación de la forma inicial después de estar sometido a un esfuerzo dinámico.

Algunas de las propiedades citadas pueden mejorarse utilizando betunes convencionales: la resistencia a la deformación plástica puede aumentarse empleando betunes más duros, aunque ello supondrá una pérdida de flexibilidad a temperatura ambiente y una mayor fragilidad en frío.

Para mejorar las propiedades citadas, sin producir efectos negativos secundarios, se pueden incorporar aditivos que modifiquen sus características reológicas, es decir, que mejoren su comportamiento para una amplia gama de condiciones de temperatura o de aplicación de las cargas.

Los aditivos que se pueden emplear son muy diversos, tanto en lo que se refiere a su naturaleza como a las mejoras conseguidas e incluso a las técnicas de incorporación a los ligantes de partida. Dejando de lado los agentes tensoactivos (activantes), con los que únicamente se pretende mejorar la adhesividad con los áridos, se puede tratar de asfaltos naturales que disminuyen la susceptibilidad térmica y aumentan la cohesión del ligante, de fibras naturales o sintéticas que interaccionan físicamente con el betún aumentando fundamentalmente la resistencia a la tracción y flexión, de materiales poliméricos que mejoran las propiedades mecánicas y reológicas, azufre, etc.

En unos casos actúan directamente mejorando la reología del ligante y en otros modifican las características de la mezcla bituminosa sin que afecten a la reología del betún. Se suelen denominar ligantes modificados cuando el modificador se añade al ligante, en central o en la planta de fabricación de mezcla, y mezclas modificadas cuando el modificador se incorpora como un árido más o directamente al mezclador.

Tabla 2.2 Tipos de agentes modificadores de ligantes bituminosos

- | |
|--|
| <ol style="list-style-type: none">1. POLIMEROS<ol style="list-style-type: none">1.1. Plastómeros (poliolefinas, EVA, ...)1.2. Elastómeros (SBS, SBR, ...)2. CAUCHO RECICLADO (polvo de neumáticos)3. EXTENDEDORES (azufre, lignitos, ...)4. OXIDANTES O CATALIZADORES (manganeso, ...)5. ANTIOXIDANTES (cal hidratada, compuestos de plomo, carbón, ...)6. FIBRAS (polipropileno, poliéster, ...)7. FILLERES (negro de carbón, cemento, ...)8. MATERIALES HIDROCARBONADOS (asfalto Trinidad, gilsonita, rejuvenecedores, aceites aromáticos, ...)9. ACTIVANTES (cal hidratada, aminas, ...) |
|--|

La tabla 2.2 presenta una clasificación general, ampliamente utilizada, de modificadores, incluyendo todos los tipos [122]. Con los cuatro primeros se fabrican ligantes que responden a la definición de ligantes modificados. Sin embargo, hasta el momento, el mayor desarrollo lo han tenido las técnicas en las que el aditivo modificante utilizado es un polímero elastotermoplástico.

La incorporación de un polímero (sustancia macromolecular con propiedades viscoelásticas) a un betún dará lugar a interacciones entre las moléculas del primero y los componentes del segundo, y producirá alteraciones en el sistema coloidal del betún con el consiguiente cambio de propiedades. Las interacciones y cambio de propiedades producidas dependerán de los siguientes factores [118]:

- Composición y estructura molecular del polímero incorporado (masa molecular, temperatura de transición vítrea, polaridad, etc.).
- Composición química y estructura coloidal del betún asfáltico.
- Proporción relativa de betún y polímero.
- Proceso de incorporación (modo de fabricación, temperatura, tiempo de mezclado, etc.)

Los betunes modificados con polímeros están constituidos, generalmente, por dos fases, una formada por las partículas de polímero y la otra por betún. En las mezclas con bajas concentraciones de polímero, la fase continua corresponde al ligante y la fase discontinua al polímero que se haya disperso en aquella; pero si se aumenta la proporción de polímero en el ligante, se produce una inversión de fases, y la fase continua la constituye el polímero hinchado por los aceites malténicos.

Con la utilización de los polímeros se persigue fundamentalmente, además de rigidizar y/o flexibilizar el betún, incrementar su viscosidad y modificar su

susceptibilidad térmica. La consistencia del betún depende de la temperatura, con una variación continua dentro de las temperaturas de servicio. Los problemas se producen para temperaturas extremas dentro de los límites del rango: para temperaturas de 40 a 60 °C, usuales en muchas de nuestras carreteras durante la época estival, se dan consistencias excesivamente bajas que pueden llevar a deformaciones plásticas, y para temperaturas inferiores a 5 °C, consistencias excesivamente altas que pueden llevar a roturas por fragilidad. Al añadir polímeros a los ligantes se produce un incremento de la viscosidad para las temperaturas superiores a 5 °C, junto con una disminución de la sensibilidad térmica en el mismo rango de temperaturas [122].

El aumento de viscosidad lleva a utilizar betunes de partida un grado más blandos que los de proyecto. Con ello se consigue también mejorar el comportamiento en la forma señalada para las temperaturas medias-altas, mientras que se puede aprovechar la baja viscosidad del betún de base para aumentar la resistencia a la fisuración a bajas temperaturas.

Un efecto importante del incremento de la viscosidad a altas temperaturas es que se puede aumentar el contenido de ligante en las mezclas sin riesgos de deformaciones plásticas, lo que redundaría en una mejora de su comportamiento a fatiga, una mayor impermeabilidad y una reducción del envejecimiento.

Un inconveniente del aumento de viscosidad es su influencia en la temperatura de mezclado. Dependiendo del tipo y cantidad de modificador se pueden dar aumentos de hasta 20 °C. A veces son también necesarios mayores tiempos de mezclado. Esto significa, en general, que es necesario más combustible para el funcionamiento de la planta.

Dada la gran variedad de polímeros comerciales existentes, con composición química y propiedades diferentes, cabe pensar que las posibilidades de modificación de ligantes con polímeros son muy grandes; pero el campo se reduce porque no todos los polímeros son compatibles con los ligantes bituminosos. Los polímeros empleados de forma más generalizada para modificar los betunes asfálticos son los elastómeros

termoplásticos de butadieno-estireno telebloque (SBS) y los copolímeros de etileno-acetato de vinilo (EVA).

Los SBS están constituidos por cadenas lineales o ramificadas de elementos unitarios que se repiten. Contienen poliestireno en los elementos finales y caucho sintético (polibutadieno) en los intermedios. El polibutadieno forma un sistema muy flexible que une bloques de poliestireno de gran rigidez. Cuando se incorporan al ligante, absorben los maltenos del betún, hinchándose y formando redes continuas o fragmentadas, dependiendo de su concentración.

Su principal característica es la de dotar a la mezcla de una gran flexibilidad, a la vez que se mejora el comportamiento a altas y bajas temperaturas.

El EVA se fabrica por copolimerización de etileno y acetato de vinilo. Tiene una buena compatibilidad con la mayor parte de los betunes; son estables a las temperaturas usuales de trabajo, pero con almacenamientos estáticos prolongados tienden a separarse, por lo que es conveniente reciclarlos antes de utilizarlos.

Sus principales ventajas son que mejoran la resistencia a las deformaciones plásticas, aunque en algunos países subrayan también el poder extender mezclas a bajas temperaturas por su mejor trabajabilidad.

Una vez realizada la elección del betún y del polímero es necesario dispersarlo correctamente en el seno del betún para obtener un ligante modificado con buenas propiedades, lo que exige la elección de un buen procedimiento de mezclado, así como optimizar las condiciones operativas más idóneas, de forma que se obtenga un betún modificado (BMP) homogéneo y estable.

Aunque no existen en la actualidad especificaciones españolas para los betunes modificados con polímeros, existe un borrador elaborado por el grupo de trabajo WG4 del Comité Europeo de Normalización (CEN) que recoge tres tipos diferentes de BMP, indicándose las propiedades exigidas a cada tipo, el método de ensayo utilizado y los

valores límites a satisfacer, sin mencionarse explícitamente las aplicaciones a que se destina cada tipo ni el tipo de polímero más adecuado para formular cada betún.

Sánchez Caba [124] recoge la opinión más generalizada, aunque no siempre unánime, de las aplicaciones a que se destina cada tipo:

- BMP Tipo 1: concebido para ser empleado en la fabricación de mezclas drenantes.

- BMP Tipo 2: concebido para ser utilizado en mezclas densas resistentes a la deformación y fatiga. Es un betún algo más modificado que el Tipo 1, en el que se han mejorado las propiedades elásticas y la ductilidad a bajas temperaturas.

- BMP Tipo 3: concebido para membranas antirremonte de fisuras, riegos espesos y capas intercaladas de arena-betún. Para estas aplicaciones se ha aumentado la ductilidad y elasticidad con relación a los dos tipos anteriores, tratándose de un betún más modificado. Para su fabricación deberá utilizarse un polímero que confiera elevada elasticidad y flexibilidad.