

Estado actual y futuro de estas mezclas.

Mezclas bituminosas a baja temperatura: mezclas en frío, templadas y semicalientes

A lo largo del artículo se exponen los diversos métodos, algunos muy antiguos pero que de nuevo están tomando auge, como las técnicas con emulsión bituminosa para Mezclas en Frío y Templadas, o las Mezclas Semicalientes con betún conseguidas, bien por aditivación de éste, o por modificación de los procesos de fabricación, en donde se consigue una espumación indirecta. La utilización de zeolitas es otra forma que permite trabajar a temperaturas inferiores a las habituales al producirse una espumación durante la envuelta. De la importancia de estas técnicas nos da idea el interés despertado en el último Eurobitume en donde toda una jornada tuvo como protagonista estas tecnologías.

Pocas veces una técnica relacionada con las mezclas asfálticas ha despertado tanto interés en los últimos años como las *Mezclas a Bajas Temperaturas* y la principal razón es la concienciación que se está experimentando para el cumplimiento con el Protocolo de Kyoto en cuanto a reducción de emisiones en todas las industrias.

La problemática planteada a nivel mundial sobre el Cambio Climático, las emisiones de CO₂, las energías alternativas ante la posible disminución de las reservas de las energías fósiles han hecho que desde los diferentes actores relacionados con la construcción y conservación de carreteras se estén tomando medidas para que esta industria sea lo menos perjudicial con el Medio Ambiente, conllevando al mismo tiempo una reducción en el consumo energético.

Esta concienciación ha llevado a los fabricantes de mezclas asfálticas, a las Administraciones de Carreteras y a las empresas fabricantes de ligantes hidrocarbonados a recomendar y poner a punto una serie de productos y técnicas de fabricación con las que podamos trabajar las mezclas asfálticas a unas temperaturas, más bajas que las convencionales, imprescindibles hace unos años

Introducción

Hasta fechas recientes, se ha dispuesto de dos grandes tipos de tecnologías bituminosas. Por un lado, las denominadas *en caliente* que, salvo el uso casi testimonial en riegos con gravilla, se concentran en la fabricación y puesta en obra de las

denominadas *mezclas bituminosas en caliente*. A través de estas mezclas se ponen en obra entre el 80 y el 98%, dependiendo de los países, de los betunes empleados en carreteras. Por otro lado, las denominadas *en frío*, basadas generalmente en el empleo de emulsiones, y más excepcionalmente en espuma de betún, que aunque claramente minoritarias en su uso, cubren un espectro de técnicas mucho más amplio: riegos auxiliares, riegos con gravillas, mezclas abiertas, mezclas cerradas (incluyendo también aquí materiales como las lechadas y las grava-emulsión) y los reciclados en frío.

Para llegar a esta situación se ha recorrido un camino muy largo, que arranca a mediados del siglo pasado, y en el que el foco del desarrollo se ha puesto en la calidad de las aplicaciones y, sobre todo, en la eficiencia de los sistemas. En el lado de la calidad, la evolución de la técnica ha dado entrada a mezclas más especializadas (alto módulo, drenantes, discontinuas, etc.) lo que ha permitido ir colmando las

Palabras clave: BETÚN, EMULSIÓN, ESPUMA, FIRMES, MEZCLAS BITUMINOSAS, SEMICALIENTES, TEMPERATURA, TEMPLADAS, SOSTENIBILIDAD, ZEOLITA.



Alberto BARDESI. REPSOL YPF.
José A. SOTO. PROAS.

exigencias crecientes de seguridad y comodidad de los usuarios. En el otro lado, el de la eficiencia, las mayores inversiones en maquinaria (**Fig. 1**) y los significativos incrementos de costes de la mano de obra, hacía que la mejora del rendimiento, aún a costa de mayores consumos energéticos, pareciera la forma más eficiente de mejorar la actividad. En este campo, los equipos y la tecnología en caliente se han mostrado imbatibles incluso cuando los precios de los combustibles se han disparado.

En paralelo, las tecnologías en frío no habían sido capaces de ofrecer mezclas con características mecánicas similares a las de caliente y, por ello, su campo de actividad se ha ido viendo relegado al de las vías de baja intensidad de tráfico (riegos con gravilla especialmente) y al de las operaciones de rehabilitación superficial (riegos y lechadas). Sólo en contadas ocasiones se proyectan (con técnicos que conocen bien las peculiaridades de estas mezclas) y ejecutan (con contratistas que conocen el oficio) obras con mezclas abiertas en frío y gravaemulsiones

Esta situación se ha mantenido prácticamente estable a pesar de algunos tímidos intentos de mejorar la calidad de las mezclas fabricadas con emulsión mediante el calentamiento de los áridos hasta temperaturas de 75-90°C lo que permite mejorar la envuelta y acortar los tiempos de maduración. Es el origen de lo que ahora llamaríamos mezclas templadas. También se han utilizado en ocasiones, mezclas cerradas en frío en las que la arena se preenvolvía con un bajo porcentaje de betún en planta en



[Fig. 1] .- Las tecnologías en caliente han seguido un constante proceso de mejora de los rendimientos y calidades.

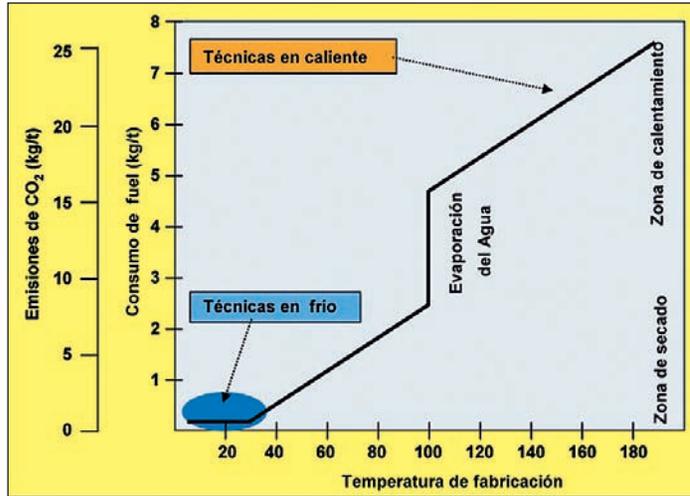
caliente y después se mezclaba junto con los gruesos y la emulsión en una planta en frío.

En los últimos diez años, aunque en algunos países más sensibilizados a las cuestiones ambientales y laborales se viene hablando de esto desde hace bastante más tiempo, se está produciendo un cambio muy significativo en nuestra forma de concebir las mezclas y todo lo que le rodea. Hablamos de *tecnologías sostenibles (Fig.2)*. Este cambio tiene que ver con aspectos muy variados pero que tienen en común entre ellos dos aspectos fundamentales:

- La *presión social y política* por el respeto al medio ambiente, por la necesidad de contribuir al desarrollo sostenible y también por algo que es más difícil de comprender y asimilar, como es que la factibilidad de encontrar eficiencias y ahorros de coste tomando medidas medioambientales.
- La *presión social y sindical* para mejorar las condiciones del entorno de trabajo de los operarios del sector. Lo que, entre otras cuestiones, se traduce en disminuir las temperaturas de las mezclas y las emisiones producidas.

En el momento actual se están haciendo importantísimos esfuerzos a todos los niveles para desarrollar soluciones que optimicen el uso de recursos y minimicen el impacto ambiental y laboral de todas las actividades relacionadas con las mezclas bituminosas. Esta tendencia, que no moda, surge en Europa, más concretamente en los países nórdicos, y ya es una realidad también en Norteamérica y, a no tardar, lo será en todo el mundo.

Como consecuencia de ello, cada vez es mayor la implicación de las empresas en todos los temas relacionados con el *Ahorro Energético, Disminución de Emisiones, Salud Laboral, etc.*, de tal forma que en cualquier tipo de in-

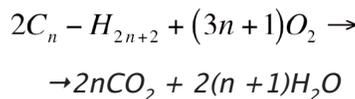


[Figura 3] .- Temperatura de fabricación y consumo de combustibles en las técnicas tradicionales.

dustría se mira con lupa cualquier producto o técnica capaz de *afectar* al Medio Ambiente y la Seguridad de las personas.

Ciertamente el impacto del sector de las mezclas bituminosas en caliente sobre el medio ambiente no es despreciable, en modo alguno. Sin entrar en valorar los impactos producidos durante los procesos de fabricación de componentes (áridos y ligantes) y equipos (maquinaria) que son comunes a otras alternativas (áridos y maquinaria) o forman parte inseparable de procesos más complejos (betunes dentro del esquema de producción de una refinería), la producción de mezclas en caliente requiere un consumo energético importante que genera un gran volumen de emisiones de gases de efecto invernadero, y otros.

El consumo típico de fuel (Fig.3) para la producción de una tonelada de mezcla en caliente se sitúa alrededor de los 6-7 kg, de los que aproximadamente un 30-35% son pérdidas, un 30-25% corresponden al calentamiento de los áridos gruesos y finos y un 15% a la evaporación del agua. Analizando la reacción de combustión de un hidrocarburo típico tenemos:



lo que para un fuel medio representa una emisión de 3-3,5 kg de CO₂ por kg de fuel consumido.

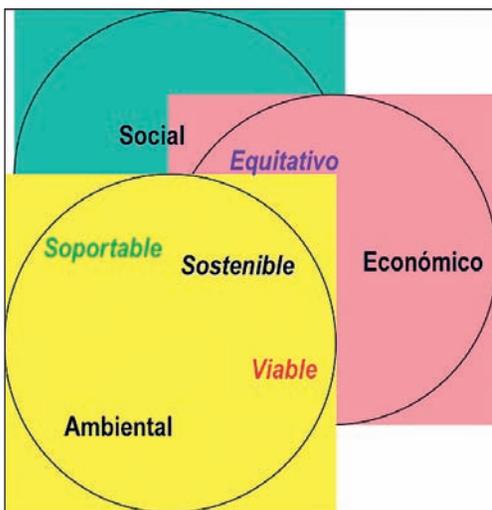
Así, la producción española del 2008, alrededor de los 40 Mt, habría generado durante el proceso productivo del orden de un millón de toneladas de CO₂. Cifra que por sí puede no decir mucho, pero que equivale a las emisiones de medio millón de coches medios haciendo 15.000 km/año. Además del CO₂, durante el proceso, se generan emisiones de otros gases: CO, NO_x, SO_x, VOC (hidrocarburos volátiles) y, por supuesto, polvo.

Además de las emisiones, el sector tiene otra forma de impacto ambiental que es el vertido de mezclas fresadas en operaciones de

rehabilitación de firmes. Ciertamente este es un tema que está ya perfectamente enfocado y, aunque en este momento los ratios de mezclas recicladas distan de estar en niveles óptimos, nadie duda que las técnicas de reciclado desarrolladas (Fig. 4) y la normativa actual deben permitir reutilizar el 100% de los materiales bituminosos fresados.

En sentido contrario, el sector de mezclas bituminosas tiene mucho que aportar a la solución de algunos problemas ambientales, en particular al reciclado y valorización material de subproductos de otras industrias (áridos siderúrgicos, p.ej.) o de residuos convenientemente tratados (residuos de demolición, neumáticos, plásticos, aceites, etc.), muchos de los cuales ya son objeto de medidas legislativas recientes.

Pero donde el avance promete ser más significativo es el campo de fabricación y puesta en obra de mezclas bituminosas donde la apa-



[Figura 2] .- Sostenibilidad-Esquema conceptual.



[Figura 4] .- Acopio de RAP y planta para reciclado en caliente de alta tasa.

rición de un amplio abanico de nuevas técnicas permiten una reducción importante del consumo energético y de las emisiones de gases de efecto invernadero pues se llega a trabajar a temperaturas cercanas a los 100 °C con betunes convencionales. Y todo ello, sin olvidar las técnicas antiguas con emulsión bituminosa que están volviendo a tener protagonismo al ser las menos contaminantes de todas.

Veremos de qué ahorro energético estamos hablando según técnicas, cuales son las que reducen más las emisiones de gases que contribuyen al efecto invernadero o aquéllas que reducen los riesgos laborales. Estamos en un proceso que no tiene vuelta atrás pero que tendremos que valorar detenidamente en cada caso no sólo desde el punto de vista económico, sino también desde el punto de vista ambiental.

Sistemas para conseguir reducir la temperatura de fabricación y puesta en obra de las mezclas asfálticas

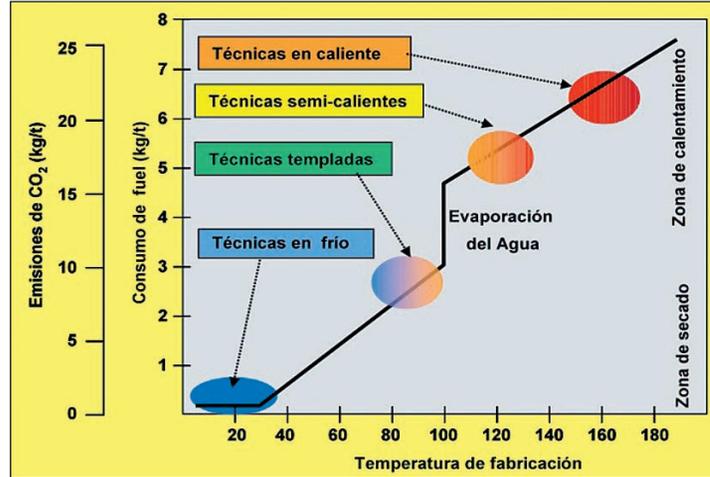
La disminución de las temperaturas de fabricación y puesta en obra de mezclas bituminosas (incluyendo reciclados) y, por tanto, del consumo energético y de las emisiones, puede conseguirse por diferentes vías:

- Aditivación del betún.
- Espumación del betún.
- Incorporación de materiales específicos en el proceso de mezclado.
- Modificando las técnicas de fabricación de las mezcla.
- Empleo de emulsión bituminosa (vía tradicional o en planta en caliente).

No es sencillo realizar una clasificación de estas técnicas. Una forma bastante extendida es en función de la temperatura de fabricación (Fig.5):

- Mezclas **Semicalientes** (*WMA: Warm mixes*, en inglés; o *enrobés tièdes*, en francés) para las mezclas fabricadas por encima de 100°C y con un límite superior de unos 140°C.
- Mezclas **Templadas** (*Half-Warm mixes*, en inglés; o *enrobés semi-tièdes*, en francés) para las mezclas fabricadas por debajo de 100°C y con un límite inferior de unos 60°C.
- Mezclas **en Frío** (*Cold mixes*, en inglés; o *enrobés à froid*, en francés) para las mezclas fabricadas a temperatura ambiente, esto es, sin calentar áridos ni ligante.

Las diferencia esencial entre ellas es que en las templadas el proceso de calentamiento no llega a los 100°C y no se pretende secar totalmente el árido, con lo que se reduce más el consumo de combustible (por la menor temperatura y porque se evita el calor latente de



[Figura 5] .- Posicionamiento de los nuevos tipos de mezclas. Temperatura de fabricación y consumo de combustible.

vaporización). Las *mezclas templadas* se fabrican normalmente entre 70 y 95°C mientras que las *semicalientes* se suelen fabricar entre 20 y 30°C por debajo de las mezclas en caliente convencionales. No obstante, algunos de los tipos de mezclas semicalientes que veremos están a caballo de ambas técnicas pues emplean sistemas en los que parte del árido se seca y parte se introduce a temperatura ambiente.

Otro aspecto característico es el tipo de ligante empleado: betún, emulsión o espuma de betún (Fig.6). En las *mezclas templadas* se emplean emulsiones y, eventualmente, espuma de betún. En las *mezclas semicalientes* se emplea betún o betún modificado y también, en ocasiones, espuma de betún, a veces combinada con betún. Pero también es bastante común, como veremos a continuación, inducir la autoespumación del betún mediante la adición de agua al sistema.

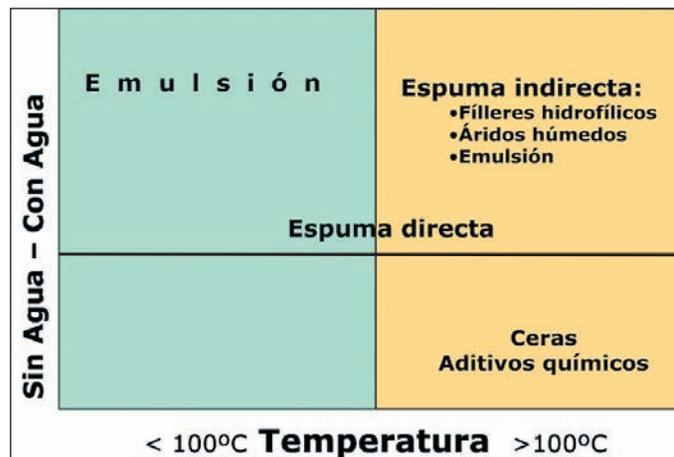
En cuanto a las tipologías granulométricas de estas mezclas, lo más habitual en las mezclas semicalientes ha sido emplear las del tipo AC pero también se han empleado con éxito las del tipo BBTM, PA y, en otros países las SMA y HRA. En las mezclas templadas ha sido más corriente el uso en rodaduras del tipo BBTM y PA. Es remarcable también el éxito de esta tecnología de mezclas templadas en reci-

clados *templados* realizados al 100 % de RAP. Por supuesto cabe pensar también en realizar mezclas SMA (que por sí mismas suelen ser templadas).

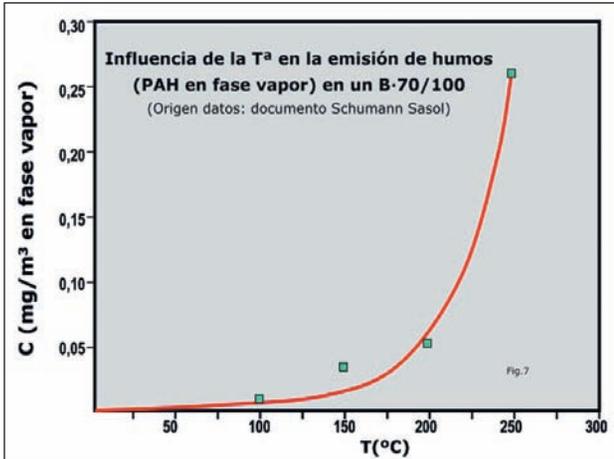
En principio, en todos los casos el objetivo esencial es fabricar mezclas que cumplan los estándares de calidad de las especificaciones, por ejemplo los artículos 542 y 543 del PG-3, fabricando a temperaturas sensiblemente inferiores a las habituales. Ello no implica necesariamente fabricar exactamente lo mismo que con las mezclas en caliente. Por su concepción, algunos de los sistemas propuestos pueden requerir cambios, a veces significativos, en la composición de las mezclas y formas de trabajo algo diferentes de las convencionales pero también perfectamente válidas.

Sea cual fuere el método seguido, los objetivos que buscamos fabricando con este tipo de mezclas son:

- **Medioambientales:**
 - Ahorro energético.
 - Disminución de las emisiones de gases (Fig.7).
- **De seguridad:**
 - Mejores condiciones de trabajo, seguridad y salud laboral.
 - Ausencia/disminución de partículas en suspensión.



[Figura 6] .- Ligantes a emplear en los nuevos sistemas.



[Figura 7].- Disminución de las emisiones de gases.

[Figura 9].- Mezcla semi caliente con ceras polietilénicas.



• **De calidad:**

- Mezclas más uniformes (menor segregación).
- Mejor trabajabilidad (juntas, compactación, etc.).
- Menor envejecimiento de los ligantes.

• **Económicos:**

- Menor gasto en conservación de las instalaciones.
- Ampliación de la temporada/jornada de aplicación.
- Almacenamiento en silos por mayor período de tiempo.

do reducir la Tª de fabricación en unos 30°C y la de compactación incluso por debajo de los 100°C. Es posible también incorporar estos aditivos por vía seca (Fig.8) con un equipo móvil de dosificación automático en la planta asfáltica.

Otros productos con los que es posible reducir la viscosidad del betún son las ceras (Fig.9). Dentro de éstas hay diferentes tipos: Naturales, parafínicas, no parafínicas 100 % sintéticas, no parafínicas parcialmente sintéticas, amidas de ácidos grasos, de polietileno, etc.

Entre las de origen natural, está el comercialmente denominado **Asphaltan-B**®, mezcla de una cera natural de Montana refinada con una amida de ácido graso, que tiene un punto de fusión entre 82 y 95°C. Más conocido y empleado con éxito en muchos países es el **Sasobit**®, cera tipo *Fisher-Tropsh*, con un punto de fusión mayor de 98°C y que se solubiliza en el betún entre 110 y 115°C y que tras la puesta en obra de la mezcla, en régimen de temperatura decreciente, solidifica entre 125 y 65°C en forma de pequeños cristales regularmente distribuidos.

Otro producto disponible es el **Licomont**® **BS 100** de *Clariant*, obtenida por reacción de amidas con ácidos grasos, cuyo punto de fusión se encuentra entre 141 y 146°C. Existen

otros productos de este mismo tipo que han venido empleándose en técnicas de impermeabilización in situ. Otro producto de este grupo es el **Rheofalt**® **LT70**, aditivo compuesto (de alto y bajo peso molecular) formado por mezcla de ceras parafínicas sintéticas, resinas de hidrocarburos, polímero termoplástico e inhibidores de oxidación; actúa como reductor de viscosidad del ligante permitiendo fabricar mezclas entre -20 y -40°C a la temperatura habitual. Con niveles de precio inferiores a éstos, pero también con menor calidad por su heterogeneidad, es posible encontrar subproductos de la fabricación de ceras polietilénicas que cumplan una función similar.

Con ellas se consigue bajar la viscosidad del ligante en el rango de las temperaturas altas y por tanto la temperatura durante el proceso de mezclado y compactación (en general, unos 20-30°C). Por el contrario, en el rango de temperaturas de servicio las viscosidades aumentan mejorando el comportamiento a deformación plástica y el módulo de la mezcla en comparación al que tendría con el betún original.

La forma de adición habitual es al betún en proporciones del 2,5 al 4%, es decir, alrededor del 0,12-0,18% sobre mezcla, aunque en EE.UU. suelen ir a dotaciones inferiores. La incorporación previa de aditivos al betún quizás sea una de las maneras más fáciles de trabajar para el fabricante de mezclas asfálticas ya que no necesita actuar sobre la planta, salvo en lo relativo a disminuir la temperatura de los áridos entre 20°C y 50°C. Esta técnica se ha probado con éxito en diversas obras del Ministerio de Fomento, CCAA y Ayuntamientos, incluso existe una experiencia con betunes modificados.

En el gráfico (Fig.10) se puede apreciar la disminución de la viscosidad del betún con aditivo respecto a un B 60/70 convencional. Se observa que a partir de 90°C hay un cambio de tendencia en la curva de viscosidad, gracias al cual podemos trabajar la mezcla a temperaturas más bajas.

Sistemas de mezclas semicalientes

Dentro de los sistemas para preparar mezclas semicalientes se pueden distinguir dos grandes grupos, según que incorporen, o no, algo de agua al sistema para producir una espumación del betún.

Sistemas semicalientes sin agua

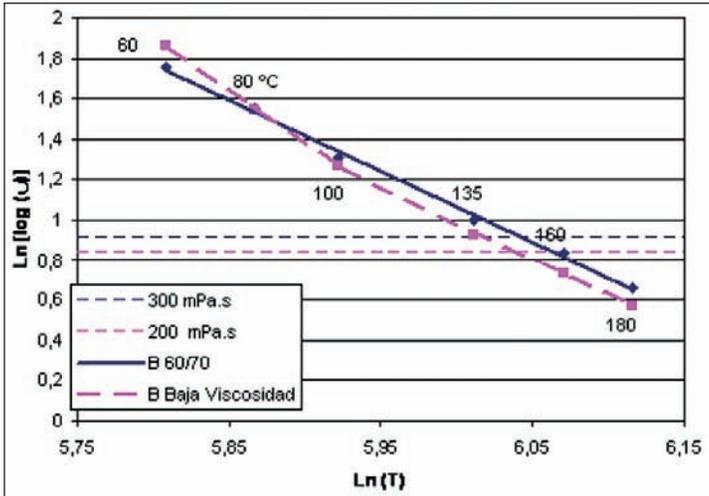
Los que no incorporan agua, recurren o bien a la incorporación de aditivos químicos o a la de ceras.

Dentro de los aditivos químicos encontramos productos, como el **Iterlow-T**®, o el **Cecabase RT92 Bio** que con pequeñas proporciones, 0,2 % - 0,4 % s/b, y sin modificar la viscosidad del betún ni sus características empíricas y reológicas actúan en la interfase betún/áridos aumentando la fluidez de la mezcla. En general la incorporación en el betún de estos productos es fácil, lográndose con una pequeña agitación o incluso diluyendo en línea durante la carga de cisternas. También se puede incorporar en la misma planta de mezcla en tanque o en la báscula de betún.

Hay otros aditivos más complejos, como el **Rediset**® **WMX** desarrollado por *Akzo Nobel*, compuestos por mezclas de ceras parafínicas sintéticas, resinas de hidrocarburos, polímeros termoplásticos e inhibidores de oxidación de los denominados químicos que sí modifican la viscosidad del betún lo que nos permite poder manejar éste a menor temperatura, permitien-



[Figura 8].- Presentación típica de aditivo para vía seca.



■ Figura 10] .- Relación viscosidad-temperatura.



■ [Figura 12] .- Fabricación de mezcla semicaliente por espumación inducida.

Mezclas semicalientes con incorporación de agua

La incorporación de pequeñas cantidades de agua a una mezcla bituminosa en caliente tiene dos objetivos: producir la espumación del betún facilitando la envuelta del árido y reducir el rozamiento entre partículas minerales facilitando la compactación. Aunando ambos efectos se pueden reducir las temperaturas de fabricación y puesta en obra para obtener, si todo marcha bien, mezclas con características similares a las obtenidas en mezclas convencionales en caliente.

Existen varios métodos para incorporar agua al sistema que podemos agrupar en:

- Inducir la espumación incorporando al mezclador un filler hidrofílico.
- Inducir la espumación incorporando al mezclador áridos parcialmente húmedos.
- Inyectar espuma directamente al mezclador.

Filleres hidrofílicos

Aunque no el único, el más difundido es la zeolita que es un aluminosilicato. Su uso es conocido desde mediados de los noventa en Alemania. Actualmente las zeolitas sintéticas más conocidas son las denominadas **Aspha-min**[®], que emplea Eurovia, y **Advera**[®] de PQ Corporation.

Esta zeolita sintética (Fig.11) contiene en su forma cristalina alrededor de un 20-25 % de agua, por lo que al añadirse, en pequeñas proporciones (0,3 % s/a), a los áridos calientes (alrededor de 130°C) justo antes del proceso de envuelta liberan el agua en forma de vapor. Se produce un efecto de “espumado”, aumentando el volumen del ligante, lo que permite la envuelta a temperaturas más bajas de las habituales. Con este sistema conseguimos reducir la temperatura de aplicación de la mezcla entre 20°C – 30°C lo que puede suponer un ahorro de 1 a 3 litros de fuel por tonelada de mez-

cla, lo que puede representar un - 20 %, -30 % del consumo total de una mezcla a 160°C.

Además de las zeolitas, existen otros productos como el desarrollado por Nynas con el nombre de **LT-Asphalt**[®] que combina un proceso de espumación basado en un ligante específico con la incorporación de un 0,5-1,0% de un filler hidrofílico que ayuda a mantener el control de la humedad de la espuma. Los áridos se calientan a 90°C.

Incorporación de áridos húmedos al mezclador

El más difundido procedimiento es el del mezclado secuencial con espumación inducida. Procedimiento conocido como **LEA**[®] (Low Energy Asphalt, en inglés), registrado por el grupo francés *Appia-Eiffage*. Existen tres versiones:

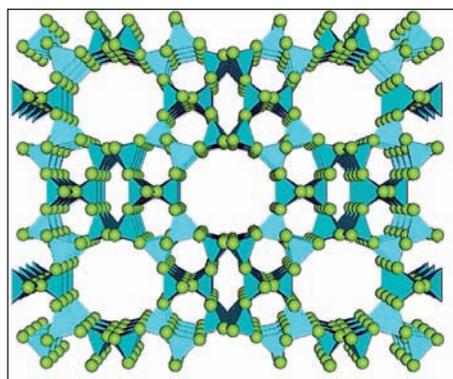
- **Método EBE**[®]: *Enrobé Basse Energie*, en francés. Se secan y calientan hasta unos 140°C los áridos gruesos y parte de la arena. A continuación, se envuelven con todo el betún que se inyecta a 170°C. Posteriormente se añade el resto de la fracción fina, fría y húmeda, induciéndose la espumación que facilita la envuelta de la arena fría llegándose a una temperatura final de unos 100°C y man-

teniendo la mezcla una humedad residual que facilita la manejabilidad necesaria para la puesta en obra.

- **Método EBT**[®]: *Enrobé Basse Température*, en francés. Se calienta todo el árido hasta los 100°C, lo que supone que no está totalmente seco. No obstante puede incorporarse agua para llevar al sistema a una humedad del orden del 1-1,5% que asegure la posterior espumación. A continuación se introduce el betún a 170°C y se forma la espuma que permite la envuelta. La mezcla producida termina a unos 95°C y manteniendo la mezcla una humedad residual que facilita la manejabilidad necesaria para la puesta en obra.
- **Método EBT-2**. En esta variante del anterior, se secan los áridos gruesos y parte de la arena hasta unos 130-150°C. A continuación se introduce la arena húmeda de forma que la mezcla se sitúa a unos 100°C. Se incorpora el betún a 170°C, formándose la espuma que permite la envuelta. Si es preciso, antes del betún, se añadirá el agua precisa (humedad del 1-1,5%) para conseguir la espumación del betún. El resto es igual al anterior.

Opcionalmente la mezcla puede incorporar un 0,5% de un mejorador de adhesividad justo antes del mezclado.

En principio, estos sistemas pueden ser utilizados en cualquier tipo de planta (Fig. 12), continua o discontinua, a las que deberá adaptarse una línea para la introducción del agua y otra para el aditivo. No obstante, debe tenerse en cuenta que para ello es preciso poder regular los quemadores para ajustar las temperaturas de los áridos bastante por debajo de las temperaturas habituales de trabajo. La temperatura final de la mezcla es inferior a 100°C y presenta un aspecto similar a una mezcla en caliente convencional pero sin emisión de



■ [Figura 11] .- Esquema de zeolita.

humo. A destacar la buena trabajabilidad de estas mezclas en el extendido y sobre todo en la formación de juntas. La energía de compactación será algo superior a la convencional para lograr expulsar el agua residual. Se consigue con un aumento de pasadas con el compactador de neumáticos. Al terminar su puesta en obra las mezclas tienen características mecánicas cercanas a sus valores definitivos, y su humedad residual es inferior a 0,5 %.

Incorporación directa de espuma de betón

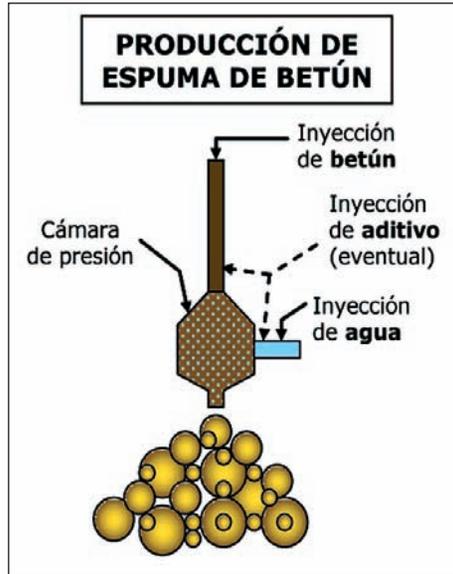
Se trata de una técnica antigua, años 50, bastante utilizada en algunos países como Sudáfrica y Canadá pero que en Europa (se ha realizado alguna obra de reciclado en Noruega, Gran Bretaña y Países Bajos) y, más concretamente, en España es una técnica que continúa casi en periodo de experimentación.

La espuma es otra posibilidad que tenemos de aplicar un betón en carretera a temperaturas más bajas de las usuales a las que aplicamos las mezclas en caliente, y hasta ahora se ha utilizado preferentemente en reciclado de firmes y en estabilizaciones de suelos, en sistemas que podríamos considerar como mezclas en frío.

El proceso de espumación (Fig.13) es aparentemente simple y se produce al inyectar, a presión, agua, en cantidades pequeñas (aproximadamente un 2 %), en el betón caliente. A la salida del conducto el betón se expande aumentando su volumen unas 10-20 veces produciéndose la espumación de éste con la que fácilmente se consigue envolver los áridos. La efectividad del proceso de espumación se valora a través de 3 parámetros:

- Tasa de Expansión Máxima**, (corresponde a la mayor expansión volumétrica).
- Relación de Expansión** (la relación existente entre el volumen máximo alcanzado por la espuma y el inicial del betón después de un tiempo definido).
- Vida media**: el tiempo en segundos que tarda la espuma en perder el 50 % del volumen máximo alcanzado. Valores típicos pueden estar comprendidos entre 40 y 80 segundos. Es la medida de la estabilidad de la espuma.

Estos parámetros se verán influenciados por la naturaleza del betón (parecen funcionar mejor los nafténicos y parafínicos), la temperatura de éste durante el proceso, el % de agua añadida y los aditivos eventualmente utilizados en alguna de las fases (agua y/o betón). Cuanto

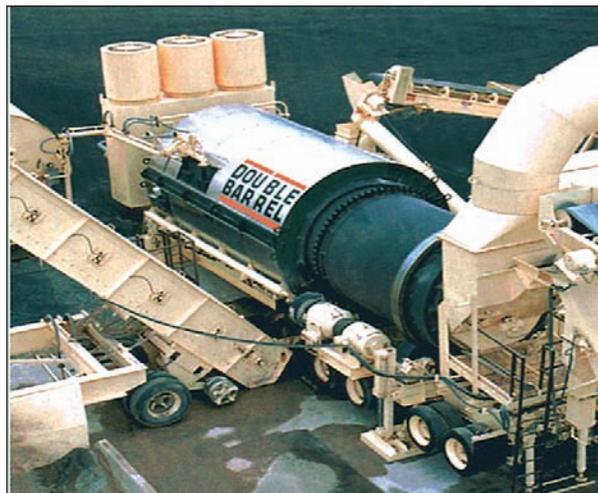


■ [Figura 13] .- Espumación de betón.

mayor sea el tiempo de expansión conseguimos que la mezcla con los áridos sea mejor.



■ [Figura 14] .- Planta de laboratorio de espuma de betón.



■ [Figura 15] .- Planta Astec de doble tambor.

Para el estudio en laboratorio de mezclas con espuma de betón se emplean miniplantas (Fig.14) que reproducen de una forma bastante fidedigna las condiciones industriales.

Se ha podido ver que la adición de cal hidratada o de cemento mejora considerablemente la resistencia al agua de estas mezclas fabricadas con espuma-betón.

A efectos de su aplicación en mezclas semicalientes se han desarrollado dos procedimientos:

- Mezclas con betón y espuma. Se conoce como *WAM-Foam Process* y no emplea ningún tipo de aditivos. Está patentado por *Shell*. El procedimiento consiste en calentar los áridos (sin filler) a unos 130°C y se mezcla en primer lugar con un ligante blando (que constituye aproximadamente el 25% del ligante total) y después con el ligante duro que se incorpora espumado (inyección en línea de un 2-5% de agua fría al betón a 180°C). En Europa el procedimiento se ha empleado de forma habitual en Noruega.

- Envuelta en doble tambor. Desarrollado por *Astec* (Fig.15), el procedimiento se desarrolla en las plantas de doble tambor a las que se añade en el tambor exterior de mezclado un grupo de inyectores por los que se incorpora la espuma de betón. El árido se calienta en el tambor interior hasta los 135-140°C, se mezcla con la espuma en el tambor exterior y puede compactarse hasta los 115°C.

En España no hay experiencias con ninguno de estos procedimientos.

Estudio de las mezclas semicalientes en el laboratorio

Los ensayos para el diseño de estas mezcla en el laboratorio serán los mismos que los utilizados para las mezclas convencionales: Sensibilidad al agua, Deformaciones plásticas, huecos, densidades, etc.

Habrà que tener en cuenta a la hora de fabricar las probetas la temperatura recomendada de fabricación y compactación para acercarse lo más posible a las condiciones de obra, lo que no siempre es posible, especialmente en las técnicas que incorporan agua porque los tiempos de mezclado en laboratorio suelen ser mayores que en los mezcladores de las plantas.

La compactadora giratoria nos da una buena información de la compactación alcanzada según los ciclos y las temperaturas de compactación. En este sentido, parece una herramienta casi indispensable para el desarrollo de

estos sistemas en los que uno de los aspectos críticos es la compactación.

Los resultados deben ser, como mínimo, similares a los obtenidos con los betunes convencionales a las temperaturas habituales, 160°C, de fabricación. Pero no necesariamente idénticos. En especial, se debe tener en cuenta que las menores temperaturas de fabricación hacen que el betún sufra un menor envejecimiento y, por tanto, el ligante final será más blando que en la mezcla en caliente convencional correspondiente. Como consecuencia, son esperables valores algo menores de módulo y deformaciones en pista algo mayores.

En este tipo de mezclas y como consecuencia de la variación de la viscosidad, en algunos casos, del betún aditivado y, por tanto de su manejabilidad las probetas *Marshall* deben fabricarse a diferentes temperaturas de mezclado y compactación con la curva teórica obtenida en el laboratorio y el % de betún necesario.

Fabricación y puesta en obra de las mezclas semicalientes

Una vez realizado el estudio en el laboratorio se debe poner a punto la planta para adaptar los quemadores a la temperatura que queramos calentar los áridos que será la temperatura final, aproximada, de la mezcla.

Los aditivos deben incorporarse al betún, preferentemente, en los puntos distribuidores para que la disolución sea homogénea. El transporte a obra se realiza en transporte convencional a la temperatura que recomienda el fabricante.

La maquinaria utilizada en la compactación es la convencional con rodillo metálico con vibración en ambos rodillos y un compactador de neumáticos.

En el extendido en obra se comprobará en un tramo de ensayo previo, la temperatura mínima a la que podemos compactar para conseguir unas características de mezcla de acuer-

do con lo obtenido en el laboratorio en cuanto a % de huecos y densidades.

Se debe hacer un control de calidad, lo más exhaustivo posible sobre todo en las primeras obras siendo conveniente realizar ensayos y comprobaciones de:

- Temperatura de mezclado en planta.
- % de ligante, granulometría y huecos.
- Módulo, fatiga, deformaciones plásticas.
- Recuperación de ligante para ver cómo queda tras el extendido.
- Evolución de la temperatura de compactación y de las densidades *in situ*.
- Extracción de testigo para su estudio.

Ventajas medioambientales de las mezclas semicalientes

Las principales ventajas son el ahorro energético (hasta del 50%), la reducción de riesgos laborales, la disminución de las emisiones de aerosoles y humos, el menor envejecimiento del betún y la mejor trabajabilidad de las mezclas

Dependiendo de los sistemas y de los tipos de aditivos utilizados podemos horquillar algunos valores de ahorro energético y disminución de emisiones.

Según el **Cuadro I** se aprecia un ahorro importante de energía y una disminución considerable no sólo de las emisiones de gases sino también del polvo generado en la planta. Teniendo en cuenta el consumo total de energía consumido en la fabricación de una mezcla, incluido los materiales y el transporte, la bajada de temperatura en esta técnica representa un tercio del consumo total y el resto corresponde al betún, a los áridos y al consumo eléctrico de la planta

Conclusiones sobre los diferentes sistemas utilizados en mezclas semicalientes

- La puesta en obra de mezclas bituminosas fabricadas con betunes aditivados a temperaturas inferiores a las convencionales resul-

Parámetro	Diferencia
Tª de gases (°C)	- 25 %
CO ₂	-20 %, -25 %
NO _x	-15 %, -25 %
CO	-25 %, -30 %
SO ₂	-15 %, -20 %
Polvo (mg/m ³)	-80 %, -90 %
COV	-18 %, -22 %

[CUADRO I] .- Ahorro energético y disminución de emisión de gases.

ta más fácil que las convencionales al poderse trabajar a temperaturas más bajas.

- Se han llegado a bajar hasta 30°C - 40°C la temperatura de aplicación.
- Con la Zeolita el consumo energético cae en un 20 % - 25 %.
- El ahorro en fuel puede llegar hasta un 25 % - 30 %.
- La reducción radical de humos y partículas en suspensión es otra de las características de estas mezclas,
- Con algunas de estas mezclas se consigue aumentar el rango útil de trabajabilidad hasta los 70°C.
- La reducción de emisiones puede llegar al 40 %.

Sistemas de mezclas templadas

Como ya se ha indicado, estamos ante los procedimientos en los que las mezclas se producen sin llegar a calentar los áridos por encima de 100°C y que se colocan en obra normalmente entre los 60 y 90°C. En este caso no existe una variedad de soluciones tan amplia como en el caso de las mezclas semicalientes y, de hecho, la experiencia española se concentra en las mezclas templadas en las que el ligante empleado es una emulsión (**Fig 17**).



[Figura 16] .- Mezcla semicaliente con emulsión.



[Figura 17] .- Mezcla templada con emulsión.

Mezclas Templadas con emulsión bituminosa

Son mezclas que se empezaron a utilizar en los años 80 en algunas zonas húmedas para paliar los problemas de curado de las mezclas abiertas en frío y para la reparación de mezclas drenantes en caliente.

Se obtienen realizando la envuelta en una planta en caliente, con áridos a una temperatura entre 85°C – 95°C y una emulsión bituminosa como ligante. El objetivo es conseguir, de una forma fácil y sin modificaciones en la planta, una mezcla que compagina parte de las ventajas de las mezclas en frío y de las de las mezclas en caliente:

- De las mezclas en caliente:
 - Fabricarse en las plantas, en caliente con un mayor control.
 - Lograr una gran cohesión inicial disminuyendo el tiempo de maduración.
 - Conseguir envueltas al 100 % como consecuencia de la temperatura de fabricación y mayor limpieza de los áridos.
 - Alcanzar mezclas con unas características mecánicas prácticamente idénticas en el ensayo *Cántabro* para las drenantes y en el Módulo dinámico para Reciclados y Mezclas cerradas.
- De las mezclas en frío:
 - Disponer de mezclas más flexibles y almacenables.
 - Disminuir el consumo de combustible en la fabricación de la mezcla.
 - Reducir considerablemente las emisiones de gases.

El proceso no precisa ninguna modificación en la planta de aglomerado en caliente. Sí tendrá que añadirse un tanque para la emulsión, preferentemente calorifugado, y una manguera desde éste al mezclador con la única precaución que la emulsión no debe pasar por ningún conducto de la planta calorifugado a la temperatura del betún (> 100°C). A diferencia de las mezclas en frío, la rotura de la emulsión se produce en el interior del mezclador al contacto

con los áridos calientes. La manejabilidad queda garantizada por la baja viscosidad del ligante y una cierta humedad residual en la mezcla.

La mezcla podrá cargarse directamente en camiones y enviada al extendido o bien almacenarse en un acopio, como las mezclas en frío, siempre que la temperatura de extendido no baje de 40°C para las mezclas en abiertas o 60°C para las cerradas. El extendido, compactación y apertura al tráfico es idéntico a la de unas mezclas en caliente. El recebo con arena, empleado a veces en las mezclas en frío, nunca es necesario en este caso.

Con esta técnica se pueden hacer mezclas de diferentes composiciones granulométricas, incluyendo el Reciclado al 100 % en planta. La diferencia estará sólo en el tipo de emulsión. Además de por el tipo de rotura, las emulsiones podrán diferenciarse por el tipo de ligante base, betún blando, duro y/o modificado. Con este abanico de posibilidades se impone siempre un estudio previo para ver la fórmula de trabajo en el laboratorio que deberá realizarse en unas condiciones similares a las que después se tendrá en obra.

Mezclas abiertas templadas

El huso granulométrico más utilizado es el que correspondería, aproximadamente, con el *PA-11*, aunque también se han empleado granulometrías correspondientes a los antiguos *AF-10* y *AF-12* incrementando ligeramente el cernido por el tamiz 2 mm. En cuanto al ligante se trata habitualmente de emulsiones *ECMm* (o *E67BPF* en la nueva denominación europea).

Para su diseño en laboratorio, además de los ensayos típicos para la mezclas en frío, también se realizará las pérdidas en húmedo/seco tras el ensayo *Cántabro* después de un proceso de curado en estufa 48 horas a 75°C y, posteriormente, dejándolas enfriar (mínimo 2 horas a 25°C) antes de romper en el *Cántabro* (200 ciclos). Las pérdidas no deberán ser superiores a 20 % en seco y a 30 % tras inmersión. Contenidos de emulsión en torno al 6,5-7% s/árido son habituales.

Mezclas Cerradas Templadas

Hasta fechas recientes no se ha empezado a valorar muy a fondo las posibilidades de esta técnica con granulometrías cerradas. La tendencia ha sido emplear granulometrías del tipo S con una emulsión sin fluidificantes pero también se están realizando aproximaciones a mezclas del tipo *BBTM*.

Desde el punto de vista operativo hay dos tendencias:

- a) Calentar el árido por debajo de 100°C.
- b) Calentar el árido por encima de 100°C.

En el primer caso efectivamente es una mezcla templada ya que la mezcla saldrá por debajo de 100°C, pero en el segundo caso con árido a 120°C-130°C y una emulsión a 70°C – 80°C la mezcla saldrá por encima de 100°C produciéndose una *espumación encubierta*, más parecida a las mezclas semicalientes que a las templadas.

Con estas mezclas la temperatura de extendido debe ser siempre superior a 60°C para garantizar su manejabilidad.

Aquí la fórmula de trabajo deberá contemplar la granulometría de la mezcla, el % de emulsión ($\approx 7,0$ %), estabilidad *Marshall*, % de huecos, densidad y las deformaciones plásticas.

Reciclados de pavimentos bituminosos a bajas temperaturas

Si alguna técnica de las muchas de las que se utilizan para la construcción de los pavimentos de las carreteras es *amigable* con el Medio Ambiente, la de los Reciclados a bajas temperaturas supera a cualquiera de ellas. Los reciclados templados con emulsión bituminosa permiten mejorar algunos aspectos de los reciclados in situ con emulsión aprovechando algunas ventajas de los reciclados en caliente en central.

La técnica consiste en mezclar el 100 % del material fresado de capas de pavimento asfáltico en una planta en caliente, continua o discontinua, en donde el ligante utilizado sea una emulsión bituminosa. El proceso se realiza calentando



■ [Fig. 18] .- Reciclado templado con emulsión.

do el 100 % del fresado a 85°C-95°C y añadiendo en el mezclador la emulsión bituminosa (Fig. 18). Las ventajas más destacables con respecto a otros reciclados en caliente y frío son:

- Trabajar a temperaturas por debajo de 100°C gracias al empleo de emulsiones bituminosas.
- Buen control previo al realizarse la mezcla en planta podemos estudiar previamente el fresado y su comportamiento con la emulsión con estudios de laboratorio.
- No es necesario un periodo de *maduración*. Aquí, gracias a la eliminación de parte del agua que compone la emulsión, la mezcla adquiere cohesión de forma casi inmediata al enfriar.
- Otra gran ventaja es que gracias a los tensoactivos de la emulsión, la adhesividad ligante/árido (fresado) es buena, no siendo necesario aditivos.
- La trabajabilidad de la mezcla es muy buena hasta los 60°C.

El estudio en Laboratorio, como cualquier reciclado, pasa por:

- Estudio de los áridos (fresado): granulometría (huso RE 2 de la O.M. 8/2001).
- Estudio del ligante envejecido para definir el ligante a emplear en la emulsión
- Estudio de la emulsión regenerante a añadir en función de lo anterior.
- Estudio de la mezcla como si fuera una mezcla en caliente.

Las obras y tramos de ensayo realizadas hasta ahora se han obtenido valores similares a los de una mezcla en caliente (Módulo dinámico > 5000 MPa), resistencias conservadas en inmersión-compresión > 80 %, y un comportamiento a fatiga de $\epsilon_6 > 100$, similar a una mezcla tipo S. A corto plazo habrá que ir obteniendo datos en base a los ensayos contemplados en la nueva normativa de mezclas.

Otros sistemas de Mezclas Templadas

Además de la experiencia española descrita sobre las mezclas templadas con emulsión, podemos encontrar otros desarrollos. El primero de ellos, muy similar a lo visto hasta ahora sería el denominado procedimiento **Ecomac**[®], desarrollado por **Screg**. Consiste en el calentamiento hasta 50-60° de una mezcla fabricada previamente en frío. El sistema requiere un consumo muy bajo de energía. Como desventaja, el campo de aplicación se reduce a vías de baja intensidad de tráfico.

Otro desarrollo es el procedimiento **LEAB**, empleado en Holanda para reciclados hasta 50% de **RAP**. Se emplea en plantas continuas donde los áridos vírgenes se calientan hasta 95°C, se incorpora por el anillo el **RAP** que se ha calentado separadamente hasta unos 110°C y finalmente se incorpora el betún al que instantes antes se le ha añadido un aditivo para mejorar la envuelta, facilitar la espumación y mejorar la trabajabilidad de la mezcla.

Finalmente, es preciso comentar que existen desarrollos a caballo entre las mezclas semicalientes y las templadas en los que los áridos se calientan a 100°C o más, la mezcla sale fabricada por debajo de esos 100°C. Uno de ellos sería el procedimiento **LEA[®]-EBT[®]** de **Appia** ya comentado, y otro el procedimiento **Evo-therm[®]**, desarrollado por **Westvaco**, que utiliza como ligante una emulsión modificada bifásica con alto contenido de betún (70%) que lleva un *paquete* de aditivos tensoactivos para facilitar la envuelta y aumentar la trabajabilidad. La mezcla se fabrica en una planta en caliente calentando áridos a unos 125-130°C y la emulsión a unos 80°C, saliendo la mezcla a unos 95°C. Se produce una evaporación del agua para la que hay que prever un sistema de salida. La mezcla puede compactarse hasta lo 75°C y se consiguen reducciones de energía del orden del 40-60% y de emisiones por encima del 60%.

Conclusiones

- Hay gran cantidad de posibilidades para trabajar a temperaturas más bajas que las convencionales de las mezclas en caliente. Elegir una u otra dependerá de los medios con que cuenten las empresas aplicadoras, del tipo de carretera, de los materiales de la zona y de las experiencias, etc.
- Tenemos procedimientos para trabajar por encima de los 100°C, los denominados Semicalientes y otros por debajo de 100°C, los Templados.
- Todos presentan ventajas medioambientales, debido a la reducción de las emisiones de gases y del consumo energético, así como ventajas en cuanto a la seguridad de las personas.
- La experiencia en España con mezclas semicalientes en donde el ligante utilizado



■ [Fig. 19] .- Mezcla abierta templada. Detalle.

ha sido un betún aditivado con ceras o con aditivos químicos ha sido muy positiva. Los estudios de control realizados a testigos de obra han dado valores similares a las mezclas fabricadas con betunes convencionales e incluso superiores (deformabilidad) en el caso de las ceras.

- En cuanto a las mezclas semicalientes por aportación de agua en el momento de la mezcla para provocar una espumación, queda la duda sobre qué pasa con ese agua y cuánto tiempo permanece en las mezclas y el control en planta del % que necesita. Por otro lado estos sistemas, además de estar sujetos a patentes, deben modificar las plantas para la introducción del agua por lo que podría dificultar su uso generalizado.
- Las mezclas drenantes templadas con emulsión se han comportado de manera similar a las drenantes en caliente. Parece que puede ser una alternativa a tener en cuenta. Este procedimiento también está funcionando con mezclas discontinuas tipo **BBTM**.
- Las obras realizadas con reciclados templados con emulsión, en planta de caliente, con tasas del 100% de fresado se están comportando muy bien después de varios años. Se deberá observar su comportamiento en los próximos años.
- Será labor de las diferentes Administraciones de carreteras intentar dirigir hacia estas tecnologías, respetuosas con el Medio Ambiente, los futuros proyectos definiendo los criterios para cada tipo y cuantificando los ahorros energéticos y de emisiones según las técnicas.
- Por otra parte los investigadores deberán mejorar lo que tenemos hasta ahora tanto en técnicas como en productos para lograr que en un futuro cercano lo convencional sea utilizar estos métodos. ●