

Experiencia de un reciclado en caliente "in situ"

POR DIEGO MORILLO ROCHA
INGENIERO DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS.

Y

CARLOS GASCA ALLUÉ
DR. INGENIERO DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS.



Varias y conocidas son las técnicas para la renovación de los firmes asfálticos deteriorados por el efecto combinado de la circulación, sobre todo de vehículos pesados, y las inclemencias del tiempo, que provocan el envejecimiento del betún y lo convierten en un elemento frágil y quebradizo, provocando grietas y fisuras en los pavimentos que contribuyen a su rápida degradación.

Esta situación podrá paliarse o retrasarse mediante tratamientos de impermeabilización, principalmente con lechadas asfálticas. Pero la solución definitiva para la rehabilitación estructural de los pavimentos bituminosos debe pasar, sin duda alguna, por los REFUERZOS O LOS REICLADOS, utilizados indepen-

dientemente o con soluciones mixtas de ambas tecnologías.

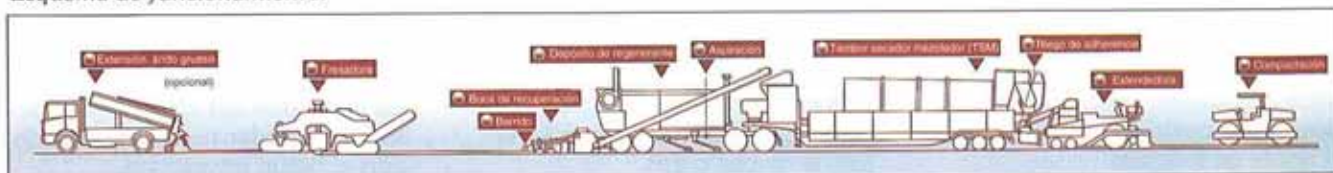
El refuerzo convencional es el sistema utilizado tradicionalmente en nuestro país, y está suficientemente experimentado como para garantizar unos resultados satisfactorios. No obstante, existirán situaciones, puntuales o en tramos importantes, que exigirán una actuación en profundidad para evitar dejar, debajo de las nuevas capas, unos deterioros que luego puedan reflejarse en la superficie, como son: roderas, blandones, fisuras y grietas, etc. Éste podría ser el caso del carril derecho de las autopistas y autovías, los carriles para vehículos lentos, los firmes con bases tratadas con cemento que han sufrido la reflexión de grietas, etc.

Para estos casos también son suficientemente conocidas las soluciones: fresado y reposición con mezclas bituminosas, o reconstrucción total del firme si el deterioro es muy importante; sellados de grietas; láminas antifisuras, etc.

Ahora bien, todo este proceso resulta lento y caro; además, el mayor espesor del refuerzo necesario para uno de los carriles hay que extenderlo a la totalidad de la plataforma, incluidos los arcenes, con un consumo innecesario de mezclas asfálticas. Por otra parte, posteriormente hay que recrecer las barreras de seguridad, muros, bordillos, tapas de registro, etc.

Igualmente, se produce una pérdida de gálibo en pasos inferiores y túneles, y un aumento de

Esquema de funcionamiento.





Fresado de un carril.

sobrecarga en tableros de puentes u obras de fábrica.

En resumen, creemos que los refuerzos sucesivos para solucionar los problemas estructurales de un firme asfáltico no son la solución adecuada, sobre todo cuando ya existe un espesor suficiente de mezclas.

Pongamos un ejemplo: supongamos una calzada de autovía de 11 m de anchura con dos carriles de 3,50, arcén derecho de 2,50 e izquierdo de 1,50. El estudio de las deflexiones, independientemente de cualquier otra consideración, establece un refuerzo de 10 cm para el carril derecho y 5 cm para el izquierdo. El refuerzo deberá ser homogéneo, de 10 cm en toda la anchura, con lo que el consumo de mezclas bituminosas necesario será:

$$11 \times 0,10 \times 1\,000 \times 2,4 = 2\,640 \text{ t/km}$$

En cambio, si se pudieran hacer escalones, y teniendo en cuenta que los arcenes generalmente no necesitan refuerzo, el consumo de mezcla bituminosa sería:

$$(3,5 \times 0,05 + 3,5 \times 0,10) 1\,000 \times 2,4 = 1\,260 \text{ t/km}$$

El ahorro de mezcla bituminosa sería, por tanto, de:

$$2\,640 - 1\,260 = 1\,380 \text{ t/k}$$

Es decir, obtendríamos más del 50% de ahorro, con lo que teóricamente podríamos rehabilitar el doble de longitud.

Ahora bien, es obvio que no podemos dejar escalones en la superficie, pero sí podemos escalar el asiento del tratamiento que se vaya a realizar.

Esto se conseguirá, sin ningún problema, mediante un reciclado independiente de cada carril con el espesor necesario.

Breve descripción de las técnicas de reciclado

Estas soluciones ofrecen, desde el punto de vista económico, la ventaja adicional de utilizar los antiguos áridos del pavimento de la calzada, limitando o suprimiendo el suministro de nuevos materiales. De igual forma, intentan dotar de nuevas propiedades plastificantes y viscosas al betún envejecido, con el fin de limitar la adición de nuevo betún.

En el transcurso de estos últimos quince años se han desarrollado varias técnicas. Todas ellas tenían por objeto proponer soluciones de renovación de los firmes (rodaduras y/o bases) con un coste menor que el de un refuerzo con unos nuevos áridos.

Entre las técnicas que se han utilizado, podemos destacar:

- El reciclado en frío.
 - En central, con o sin adición de nuevo material y adición de emulsión "in situ".
- La termorregeneración, con o sin adición de nueva mezcla, betún, o ambas cosas.

- El termorreciclado.

- En central, con o sin adición de nuevo material y de producto regenerador.
- "In situ", con o sin adiciones de nuevos áridos y adición de producto regenerador (aceites).

Si bien todas estas soluciones ofrecían un gran interés económico en unas condiciones de aplicación determinadas, se han revelado, en cambio, pobres en cuanto a sus resultados: los firmes no daban suficientes prestaciones mecánicas ni de durabilidad, con los materiales bituminosos convencionales.

Si dichas técnicas quieren seguir siendo económicas, tiene que limitarse la adición de áridos nuevos, con lo que se restringe la cantidad adicional de ligante bituminoso nuevo y se reduce en la misma medida el poder regenerador del betún final. Los materiales reconstituidos en esta forma no llegan a alcanzar unas propiedades mecánicas equivalentes a las de un nuevo aglomerado convencional.

Reciclado en frío

Esta operación puede realizarse "in situ" con un equipo móvil, o en una central fija, en cuyo caso ésta tiene que ubicarse cerca de la obra, puesto que el coste del transporte anulará todo el interés económico del sistema.

Consiste en levantar una capa del material mediante un fresado "in situ". Se sabe que esta operación de fresado se asemeja a un machaqueo de la mezcla. Los áridos obtenidos son totalmente distintos a los de las demás técnicas, ya que se trata de elementos minerales rotos, que integran en su seno varias partículas iniciales, divididas por las fracturas y ligadas entre sí por el viejo betún; su reconstitución en una mezcla bituminosa, se efectúa mediante mezcla con una emulsión asfáltica. Se puede realizar con la adición de nuevos áridos para corregir la granulometría de la mezcla. La escasa dosificación de emulsión genera una película de betún blando muy fina, incapaz de aglomerar las partículas del aglomerado viejo, ni de poder mezclarse en frío con el betún envejecido.

La capa así reconstituida corresponde a la categoría de materiales de tipo "grava-emulsión", cuyo marco y limitaciones de uso se conocen perfectamente. Dichas capas no pueden permanecer tal cual bajo el tráfico, y se hace necesario revestirlas con una o varias capas de aglomerado asfáltico.

Con el aumento de la cantidad de emulsión y la rectificación de la granulometría del producto del fresado, es posible conseguir un aglomerado en frío que ofrece una mejor resistencia a los esfuerzos tangenciales. Si bien estas soluciones son adecuadas hasta un cierto nivel del tráfico, se tiene que recurrir sistemáticamente a unos revestimientos importantes para tráficos T2, T1 o T0, ya que la operación reduce la capacidad estructural de la vieja calzada (un aglomerado en caliente tiene más capacidad de refuerzo, a espesor equivalente, que una grava emulsión o un aglomerado en frío; presencia de agua, mayor proporción de huecos, resistencia a la deformación más baja, menor resistencia a la tracción, escaso contenido de betún, calidad del betún blanda, etc.). Desde el punto de vista económico, a idéntica cantidad de rehabilitación, esta técnica resulta más costosa, habida cuenta del elevado precio de las emulsiones y de las capas adicionales. Su uso por lo tanto queda limitado a casos específicos.



Barrido de aristas.



Termorregeneración con paneles radiantes.

No entramos en otro tipo de soluciones en frío, como, por ejemplo, el reciclado con cemento, por considerarlo como un procedimiento para distintas aplicaciones de las que estamos estudiando, independientemente de otros problemas como los de fisuración.

Termorregeneración con paneles radiantes

Consiste en el calentamiento de la superficie de la calzada con la ayuda de unos paneles radiantes sobre plataformas móviles, alimentados por unos depósitos de combustible (propano) super-

puestos; la potencia de calentamiento y, por consiguiente, su duración o el número de paneles, dependen de la profundidad que haya que tratar. Esta operación es necesaria para poder escarificar y disgregar la mezcla existente, además de fluidificar el viejo betún, que luego recogerá una máquina para conducirlo a un circuito de extensión normal de una capa de aglomerado, previa introducción de un regenerante. También cabe la posibilidad de aportar un porcentaje de nueva mezcla, después de la operación de escarificado y antes de su aplicación sobre la calzada.

En la práctica, después de más de quince años de utilización, dicha técnica ha quedado paulatinamente abandonada, debido a la peligrosidad de su utilización y sus resultados aleatorios.

En efecto, además de otros factores, la operación de recalentamiento acentúa considerablemente el envejecimiento del betún; así, tras cuatro minutos de exposición del aglomerado de la calzada a las radiaciones infrarrojas, la temperatura de la capa resulta como sigue, según la profundidad:

0,2 cm	-	440° C
1 cm	-	200° C
2 cm	-	100° C
4 cm	-	40° C

Es fácil, por tanto, que el betún viejo, durante el transcurso



Vista de la máquina ART. Recuperación del material fresado.

de esta operación, se queme en sus primeras capas, perdiendo entre 10 y 20 puntos adicionales de penetración, ya de por sí muy baja por el envejecimiento, y no llegue a fluidificarse en las capas inferiores, por lo que no será posible allí su reutilización.

Si la profundidad de rehabilitación necesaria fuera mayor, por ejemplo, 8 cm (lo que es bastante normal), los efectos indicados serían mucho mayores: la temperatura superficial debería ser mucho más alta y la de abajo prácticamente no variaría, ya que está demostrado que, al calentar con un panel radiante un material fijo, no hay posibilidad de transmitir el calor de una manera uniforme.

Reciclado en central

El reciclado en central precisa también el fresado previo del material, su carga y transporte a planta, el reciclado propiamente dicho, el transporte a obra, la extensión y compactación, previo barrido y limpieza de la superficie y un riego de adherencia. Exige un acopio previo de material fresado y, con centrales convencionales, sólo es posible la utilización de un porcentaje del mismo, ya que para evitar el contacto entre la llama y el betún, que provocaría el quemado de este último, hay que introducir el material por la parte intermedia del tambor con un menor tiempo para el calen-

tamiento, la licuación del viejo betún y la mezcla; además, se precisa una adaptación de las centrales convencionales, bien sean continuas o discontinuas, una tolva especial, etc. El aprovechamiento del material fresado puede oscilar entre el 20% y el 30%, con un máximo, quizás, del 50% en casos singulares y previas adaptaciones específicas.

Termorreciclado TSM

Este procedimiento aprovecha la mejora de la tecnología del sistema de calentamiento, debido a la aparición del tambor-secador-mezclador de estructura interna específica para el reciclado, que evita el contacto directo del material fresado con la llama, además de reducir notablemente el recalentamiento innecesario de los productos recuperados.

La presencia de un mezclador en este sistema permite la adición de betún o de un regenerante; el cual, bajo el efecto mecánico dispersante de la agitación, da como resultado la mezcla íntima del antiguo ligante con el añadido, y produce de esta manera un betún rejuvenecido.

Desde el punto de vista económico, dicha técnica, para ser válida tiene que limitarse a la adición de una cantidad de betún corrector bastante reducida (menos de un 40%). De igual modo, la experiencia ha demostrado que el material regenerador tiene que ser a base de aceites con un punto de ebullición elevado o a partir de un betún blando, ya que cualquier producto con una temperatura de ebullición inferior a los 350° C desaparece en los gases de combustión durante el calentamiento.

Procedimiento de regeneración de las mezclas asfálticas con aditivos especiales

Tal como se ha descrito anteriormente, la técnica de reciclado en caliente de un material de fresado, con un agente rejuvenecedor a partir de aceites, restringe la calidad de la mezcla regenerada.



Aspiración de residuos.

Las características del betún corregido no pueden, en ningún caso, equivaler al de un betún convencional, ya que con materiales de penetración entre 5 y 15, no es posible elevarla por encima de 50.

Aun cuando dicha técnica mejora notablemente la calidad del material colocado nuevamente en obra, la mezcla constituida está compuesta, en el mejor de los casos, a base de betún 40/50; lo que en determinadas condiciones (estructura/deformación/condiciones climáticas) da como resultado una restricción de la calidad y de la durabilidad de la mezcla así elaborada.

Con el fin de mejorar de forma determinante las propiedades de los materiales obtenidos mediante una operación de reciclado en caliente, bien con una máquina móvil "in situ" o en una central asfáltica T.S.M. o discontinua, a partir de un material fresado o de áridos de mezclas machacadas y recicladas, en vez de utilizar un ligante de regeneración natural del tipo asfalto o aceite emoliente, o de asfalto fluidificado por tales aceites, el uso de un betún elastomérico con polimerización a base de aditivos/reactivos químicos podría facilitar la obtención de una mezcla con unas propiedades equivalentes a las conseguidas con los betunes polímeros. Denominaremos a este regenerante polimerizado RP (Ref. 1).

La concentración de regenerante RP que se deberá añadir será función de la naturaleza del fresado del aglomerado antiguo que se debe reciclar, y del tipo y concentración del viejo betún, con la presencia o no de nuevos áridos añadidos.

Dicha concentración se determinará mediante el estudio de la mezcla según la metodología clásica empleada en los laboratorios de carreteras.

La adición del regenerante RP al material fresado durante el proceso en caliente, debe facilitar su mezcla íntima con el betún viejo bajo la acción del mezclador (entre 130/190° C). El antiguo betún envejecido se fluidificará bajo la acción de la base asfáltica contenida en el regenerante, con



Riego de adherencia.

el que se mezclará íntimamente.

De igual modo, por el contacto del regenerante RP con el betún antiguo, se iniciará la reacción química del procedimiento, desarrollándose y extendiéndose a todas las partículas activas del antiguo ligante, dándole propiedades elásticas muy importantes, y una capacidad de deformación de la mezcla asociada a muy altos niveles de módulos de elasticidad.

Experiencia en la N-525

Sentadas estas premisas, se decidió estudiar la posible aplicación de una experiencia de este sistema en la carretera N-525 de Benavente a Santiago, tramo: Cruce de Mombuey a Padornelo.

Previamente se habían comprobado en Italia diversos tramos reciclados de autopistas de peaje, algunos con más de 10 años de vida, con aspecto muy salvable; pues allí, por motivos económicos, se dejan en la rodadura con la extensión previa de aproximadamente un 15% de árido grueso de calidad, que le proporciona textura superficial y adherencia.

Los regenerantes utilizados eran simplemente los aceites aromáticos naftánicos perdidos con el tiempo por el viejo betún, con objeto de intentar reconstituir sus características iniciales.

En primer lugar se realizó un estudio de deflexiones con el deflectógrafo Lacroix de chasis largo, para averiguar la situación estructural del firme y los espesores del refuerzo convencional necesario.

Se tomaron 20 muestras del material "in situ", obtenidas por fresado, para reproducir en lo posible la situación que iba a darse posteriormente.

Dicho material se analizó para obtener el contenido de ligante (media del 4,1%), su penetración (media de 15) y la curva granulométrica del árido residual.

Luego, en el Centro de Estudios de Carreteras del CEDEX se realizaron diversos ensayos con distintas dotaciones de regenerante RP, para obtener los módulos de elasticidad y las leyes de fatiga de la futura mezcla reciclada, con objeto de averiguar la formulación más conveniente (Ref. 2).

De los resultados obtenidos se obtuvieron interesantes conclusiones que pasan a resumirse y comentarse:

- La incorporación de regenerante al material fresado disminuye la rigidez de la mezcla, medida por su módulo dinámico y mejora la duración frente a la fatiga del material.
- Las mezclas obtenidas con la incorporación del regenerante RP son muy resistentes a la microfisuración

por fatiga a flexotracción, con un comportamiento mejor que el de las mezclas semidensas convencionales o las mezclas de alto módulo estudiadas.

- El módulo dinámico depende en gran medida de la densidad. Con las mayores densidades obtenidas ($2,4 \text{ t/m}^3$) y con el aditivo RP se han medido módulos de hasta $14\,000 \text{ MPa}$, es decir, del orden del doble del obtenido con una mezcla convencional, mientras que con las menores densidades ($2,28 \text{ t/m}^3$) es de $8\,200 \text{ MPa}$: como se ve, también muy por encima del máximo alcanzable en

ro transformado en un betún polímero elastomérico. Dicha solución tiene la ventaja de regenerar la mezcla con un betún polímero (primera y mayor innovación), que producirá una mezcla de alto módulo y que habrá de ofrecer una mayor capacidad ante las deformaciones previas a la rotura. Por lo tanto, esta mezcla podrá reforzar la calzada antigua, con la ventaja de admitir una deformación mucho mayor, compatible con la evolución de las capas inferiores, antiguas y debilitadas (segunda innovación).

El procedimiento de reciclado en caliente "in situ" se ha desarrollado con éxito en numerosos



Depósito del regenerante.

mezclas convencionales.

- La mezcla es difícilmente compactable (en laboratorio): por lo que en obra debe irse a una compactación muy enérgica. La compactabilidad mejora con el contenido de regenerante.

Estas alentadoras conclusiones permitieron tomar la decisión de acometer los trabajos de rehabilitación del firme, usando la técnica del reciclado en caliente "in situ" del aglomerado fresado con la adición del agente rejuvenecedor RP, que transformará el antiguo betún, envejecido y reblandecido por calentamiento, en un nuevo betún similar a un ligante de nueva fabricación, pe-

países; fue presentado inicialmente bajo la técnica del rejuvenecimiento con aceites, es decir, la reconstitución de un nuevo betún por fluidificación del antiguo procedente del fresado, con aceites plastificantes compatibles. Sin embargo, la evaporación de gran parte del fluyente evacuado en los humos del calentamiento fue muy criticada y tuvo una fuerte contestación por los grupos ecologistas.

Este problema no existe en la solución que nos ocupa, que además de evitar las antiguas molestias ambientales, constituirá un freno decisivo a la reflexión de grietas por su elevada resistencia a flexotracción.

Situación del tramo

El tramo que se iba a reparar se encontraba en su primera mitad, en zona ondulada y el resto de la obra en zona montañosa, con fuertes rampas. Tiene un tráfico importante con abundancia de vehículos pesados; no obstante, se han iniciado los trabajos de construcción de una autovía paralela, de trazado prácticamente independiente de la actual carretera, que atraerá la mayor parte de este tráfico y, en particular, los vehículos pesados.

Del examen visual del tramo se destacaban los siguientes puntos:

- La calzada se encontraba bastante desgastada en superficie (fisuras, piel de cocodrilo, roderas, etc.).
- Ciertos puntos estaban completamente degradados por la pérdida completa de la capacidad de soporte de la explanada.

El firme existente consistía en una subbase de zahorra, una base de grava-cemento de 20 cm , y entre 18 y 21 cm de mezclas asfálticas ejecutadas en dos fases: una primera de 12 cm hacia 1977, durante el acondicionamiento de la carretera dentro del "Plan de Accesos a Galicia" y un refuerzo posterior, hacia 1987, de 6 a 9 cm de espesor.

La primitiva estructura del firme, con bases tratadas con cemento y sólo 12 cm de mezcla bituminosa en caliente, produjo ya una total reflexión en superficie de las grietas de retracción de la grava-cemento, que posteriormente volvieron a reflejarse íntegramente en las capas de refuerzo; con lo que se perdió nuevamente la impermeabilidad del pavimento, facilitando la entrada de agua. Por ello, en la práctica totalidad del tramo, se habían extendido sucesivamente hasta tres capas de lechadas asfálticas.

Cálculo de los espesores de reciclado

Basándose en el estudio deflexométrico realizado y por medio de la Instrucción 6.3 I-C, se definieron diferentes tramos, a los que co-

respondían unos determinados espesores de refuerzo convencional. Para esos mismos tramos había que establecer unos espesores de reciclado, de tal forma que hicieran equivalente el reciclado al refuerzo, tanto en cuanto a deflexiones como a comportamiento en fatiga de ambas soluciones.

Para ello, se llevó a cabo un primer "Estudio de regeneración en caliente del aglomerado existente, como alternativa a una solución convencional de refuerzo" (Ref. 3), con el fin de calcular, según la referencia estructural equivalente, el estado de deflexión futuro en el que se encontraría la carretera después de la aplicación de la solución alternativa. Para ello, se utilizó el medio informático de cálculo de firmes "ECO-ROUTE 4 CALCO" con los programas CALCO y SOLAD, que tienen como objetivo:

- Facilitar medios para calcular las deformaciones y esfuerzos que aparecen en las estructuras multicapas.
- Dada una determinada estructura, calcular otra con diferentes características y que cumpla los mismos requisitos.
- Deducir, a través de una mezcla conocida (fatiga, módulo, etc.), los valores límites admisibles que el material puede soportar en unas determinadas condiciones de plazo de vida, tráfico, etc.

Partiendo, pues, de la estructura equivalente de la calzada, se procedió a la evaluación de los módulos elásticos del suelo de soporte, con el fin de simular un estado del mismo, de manera que, bajo una carga estándar y estática, produzca las deflexiones medidas; asignando así mismo unos valores a los módulos complejos y elásticos a 15° C y 10 Hz de los distintos materiales que componían el modelo estructural del firme. Se obtuvo así una primera aproximación a los espesores que se tenían que reciclar para conseguir unos resultados en ningún caso inferiores a los que se obtendrían con el refuerzo convencional.

A continuación, se encargó un "Análisis estructural de la rehabilitación del firme de la N-525" cuyo objeto era la justificación técnica

de una alternativa con el empleo del reciclado "in situ" en caliente, siguiendo la metodología siguiente (Ref.4).

- Estudio de las bases del proyecto de refuerzo.
- Reflexión sobre los sistemas de reciclado.
- Características de las mezclas existentes.
- Modelización del firme actual.
- Estudio de la vida residual a fatiga.
- Características de las mezclas de refuerzo.
- Cálculo estructural del refuerzo.
- Características de las mezclas recicladas.

en las hipótesis de Burmister: macizo multicapa elástico sobre macizo semi-indefinido de Boussinesq, sometido a la acción en superficie de dos cargas verticales repartidas uniformemente sobre sendos círculos.

Se calculaban así los diferentes espesores que se debían reciclar en función de los distintos escalones de la deflexión característica, recomendándose el uso de la tecnología del reciclado en caliente "como alternativa de la rehabilitación estructural del tramo estudiado y que podría resultar francamente ventajosa frente a la solución del refuerzo". Concluía el informe diciendo que, habiéndose pretendido una cier-



Salida del material regenerado y carga de la ART durante la operación (gasóleo, regenerante, y emulsión).

- Cálculo estructural por secciones recicladas.
- Comparación: deflexiones y vida de fatiga.

Para estimar las características elásticas de las mezclas bituminosas se utilizó el procedimiento contenido en el método SHELL; y para el análisis mecánico de las secciones (determinación de tensiones, deformaciones y deflexiones) se aplicó el programa informático de cálculo de firmes ALIZÉ III del Laboratoire Central des Ponts et Chaussées de Francia, en su versión modificada por el Laboratorio de Caminos de la E.T.S.I.C.C.P. de Madrid. Dicho programa se basa

ta equivalencia estructural entre ambas soluciones, el reciclado, ofrecía numerosas ventajas, derivadas unas de su propia concepción, y otras del empleo de un aditivo regenerador que permitía obtener una mezcla bituminosa de muy elevadas prestaciones.

Comparación de las soluciones de refuerzo y reciclado en caliente

No conocemos que en España se haya realizado una experiencia fiable de reciclado en calien-

te, ya que algunas aplicaciones "in situ" llevadas a cabo con el sistema de termorregeneración con paneles radiantes dieron unos resultados muy dispares.

Si se habían ejecutado varias experiencias en frío; pero, como ya dijimos, esta técnica tiene un uso limitado a casos específicos.

En cambio, de las estadísticas de la E.A.P.A. para 1994 (Ref. 5), se deduce que en Europa existen unos 30 millones de toneladas de materiales disponibles para reciclado, de los cuales aproximadamente 13,5 millones se usan para reciclados en caliente en 11 países europeos. Asimismo, 15 países manifiestan que una parte de su nueva producción de mezclas asfálticas se realiza con material reciclado, con una media para el conjunto de estos países en torno al 9%, que equivaldría a unos 21 millones de toneladas; aunque los datos de la encuesta no permiten conocer exactamente cuánto se ejecuta "in situ" o en central. No obstante, en la hipótesis de una calzada de 7 metros de anchura y una media 7 cm de espesor de reciclado, los 13,5 millones de toneladas usadas para reciclados en caliente podrían representar unos 11 500 km de calzadas recicladas en Europa, en 1994, con esas técnicas.

Por todo ello, parecía oportuno iniciar en España una expe-

riencia real, que permitiría poner a punto una tecnología de la mayor actualidad e interés, contrastada desde hace más de 10 años en otros países, y con unas enormes perspectivas de futuro para la rehabilitación de firmes envejecidos.

Además, el tramo de carretera que se rehabilitaba era muy propicio para la aplicación de esta técnica, ya que la fisuración de las bases tratadas con cemento se habían ido reflejando, como ya hemos dicho, en las distintas capas asfálticas, tanto en las primitivas como en las sucesivas de refuerzo. De esta forma, era prácticamente segura, más tarde o más temprano, su reproducción en la nueva superficie.

Sin embargo, con la solución de transformar la mezcla en una de alto módulo, mediante la incorporación del regenerante RP, podemos conseguir el mejor comportamiento a fisuración que producen, con carácter general, este tipo de mezclas, y retrasar considerablemente la reflexión de grietas de las capas inferiores.

En efecto: dice el Profesor C. Kraemer (Ref. 6) sobre la reflexión de grietas de las bases de gravacemiento: "las mezclas bituminosas más resistentes a la propagación serán las que resistan bien a la fatiga: mezclas densas, con elevado contenido de

mástic bituminoso, posiblemente con betún polímero, flexibles a las temperaturas de servicio". Pues bien, todas estas condiciones se contienen en nuestra mezcla reciclada en caliente: tiene una elevada resistencia a la fatiga, como lo prueban los ensayos realizados en el CEDEX; tiene un elevado contenido de mástic bituminoso, ya que al fresar aumentan los finos y el porcentaje de ligante final es más elevado de lo habitual al disponer del viejo betún (aproximadamente un 4,1%) y una media de un 1,2% adicional de regenerante, con lo que se alcanza del orden del 5,3% de ligante. Resulta así una mezcla densa, con elevado porcentaje de ligante, con polímeros y muy resistente a la fisuración por fatiga a flexotracción.

Ventajas de la rehabilitación de firmes por el procedimiento de reciclado en caliente con regenerante RP

Resumiremos una docena de ventajas de esta tecnología:

- 1ª) Permite actuar en cada carril de circulación de manera independiente, con el espesor necesario en cada uno, en función de sus correspondientes deflexiones y estado. Se puede así aprovechar mejor la inversión disponible que en un refuerzo convencional, que obliga a reforzar el mismo espesor en toda la calzada en base al carril de mayor deflexión.
- 2ª) No es preciso reforzar los arcones si, como es habitual, no hace falta.
- 3ª) En caso de existir bordillos, muros, barreras de seguridad, registros, sumideros, etc., no es preciso su recrecimiento o modificación, por conservarse la misma rasante.
- 4ª) No se provoca una disminución de gálibo en túneles o pasos inferiores.
- 5ª) No se producen sobrecargas adicionales en tableros y obras de paso.
- 6ª) No se modifican las condiciones del drenaje superficial, si no es necesario.



Extendido.



Superficie terminada.

- 7ª) Se obtiene un mejor comportamiento a fisuración y se retrasa la reflexión de grietas.
- 8ª) La mezcla resultante es menos susceptible al envejecimiento y tiene una mayor durabilidad.
- 9ª) Se obtiene un menor impacto ambiental, al no producir desechos de fresados a vertedero y no ser precisa la apertura de nuevas canteras.
- 10ª) La transformación en mezcla de alto módulo permite reducir espesores.
- 11ª) Se puede prescindir de la capa de rodadura incorporando un pequeño porcentaje de árido grueso de buena calidad, para conseguir las adecuadas textura superficial y adherencia.
- 12ª) Todo lo cual producirá importantes ahorros económicos que podrían evaluarse entre un 30% y un 50% con respecto a los refuerzos convencionales, dependiendo de las operaciones que se realicen y, fundamentalmente, si se extiende una capa de rodadura o no.

Sistema de ejecución

Para la aplicación de esta técnica se utilizó una central móvil ART (ref.7) del tipo Tambor-

Secador-Mezclador (TSM) que permite la recuperación "in situ" del material, su calentamiento, la incorporación del regenerante y la fabricación de la nueva mezcla regenerada, extendida inmediatamente a su salida.

En primer lugar se fresa el firme hasta la profundidad de cálculo, obtenida, como hemos dicho, indistintamente para cada carril en función de las deflexiones tomadas.

Con ello, se conforma un cordón que es recuperado por la máquina, que simultáneamente barre la superficie, sobre todo las aristas del corte, y aspira los residuos de material, transportando el producto al interior del tambor.

Allí se incorpora el regenerante: el cual, bajo el doble efecto de la temperatura y la energía de la mezcla, se diluye en el viejo betún fluidificado por el calentamiento, que no sólo recupera los componentes perdidos por el envejecimiento para conseguir sus características iniciales, sino que, además, se mejora con la aportación del nuevo regenerante RP y la reacción con los componentes que se han mantenido en el tiempo.

La ART incorpora los dispositivos para realizar el riego de adherencia, que en este caso se ha ejecutado a base de una emulsión modificada, para asegurar el pegado a la capa subyacente.

Todo el proceso se regula desde un panel de mandos hasta la salida del material regenerado, para proceder a su extensión inmediata mediante un equipo de extensión y compactación convencional.

Este sistema permite regenerar entre 80 y 100 toneladas/hora, según se trate de carreteras de doble sentido de circulación o de calzadas de autopistas y autovías; dependiendo también de otros factores como la densidad del viejo aglomerado, espesor reciclado, temperatura ambiental y, sobre todo, del grado de humedad del material fresado.

Resultados obtenidos

Tras las primeras pruebas de adaptación de la ART para la utilización del nuevo regenerante, se consiguieron los rendimientos esperados y unos resultados que superaron todas las previsiones.

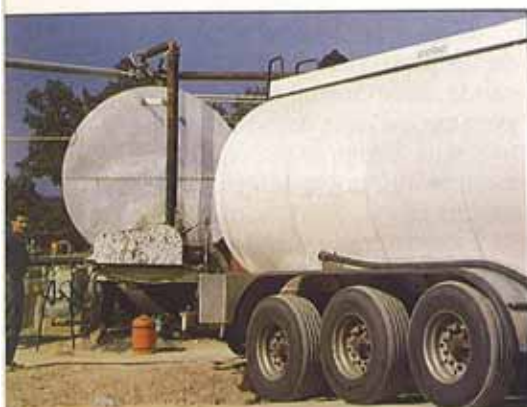
En efecto, el aspecto de la mezcla extendida era inmejorable, permitiendo el paso inmediato de la circulación en unas condiciones muy buenas y que hubieran hecho posible dejar la capa reciclada en rodadura si no fuera por su textura, demasiado fina sin la adición de un árido grueso. Evidentemente, el fresa produce una trituración adicional de los áridos; pero las lechadas bituminosas existentes justificaban ese exceso de finos y, por tanto, dicha textura.

Para comprobar los resultados, inmediatamente después de la extensión y antes de la apertura al tráfico, se tomaron testigos para obtener las características de la mezcla reciclada.

Estos datos se acompañan en las tablas adjuntas, pudiéndose



Panel de mandos de la ART.



Carga de regenerante.

comprobar la elevada calidad de la mezcla reciclada. No obstante, la recompactación que ha de producir el tráfico mejorará sus propiedades: ya que, obviamente, al aumentar la densidad aumentará también el módulo de elasticidad y mejorará las leyes de fatiga. Esta circunstancia tendrá una mayor importancia para pequeños espesores, que inicialmente son más difíciles de compactar, como lo prueban las menores densidades iniciales conseguidas.

Rodadura

Como se ha dicho, con la aplicación de esta técnica y con la previa extensión de un cierto porcentaje de árido grueso (del orden de un 15%) podría dejarse la capa reciclada en rodadura.

No obstante, en la experiencia llevada a cabo en la N-525 se decidió mantener las capas de rodadura inicialmente previstas, consistentes en 4 cm de mezcla drenante en el tramo de menor altitud y 3 cm de mezcla de granulometría partida, con ligante modificado, en los tramos que pueden verse afectados por la nieve y el hielo.

El análisis de la regularidad superficial incluido en la Tabla nº 3 confirma cuanto indicábamos respecto a la calidad real de la mezcla reciclada, que producía una rodadura confortable incluso en el primer tramo, ejecutado con una mala climatología y en el que se puso a punto este procedimiento para la rehabilitación de firmes envejecidos, que esperamos tenga continuidad.

Para ello, será preciso proseguir la observación del tramo tratado mediante ensayos y análisis, que permitan extraer unas prescripciones para su inclusión en futuros proyectos.

Referencias

(1) *Regenerante RP*: Diseñado por Emile López, de STYRELF, y comercializado por PRODUCTOS ASFALTICOS, S.A. (PROAS), del grupo CEPSA, bajo el nombre de REGESTYR AM.

(2) CEDEX, Centro de Estudios de Carreteras: *Convenio de Evaluación de materiales reciclados con REGESTYR*. Autores: A. Ruiz y J. García Carretero. Diciembre 1995.

(3) *"Estudio de regeneración en caliente del aglomerado existente, como alternativa a una solución convencional de refuerzo"*. Autores: E. López y C. Gasca. Abril 1995.

(4) *Análisis estructural de la rehabilitación del firme de la CN-525 utilizando reciclado "in situ" en caliente*. Prof. M.A. del Val, Catedrático de Caminos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid. Julio 1995.

(5) E.A.P.A. European Asphalt Pavement Association. *ASPHALT IN FIGURES 1994* (Dic. 1995).

(6) Revista RUTAS nº 54. *La reflexión de fisuras de las bases de gravacemento y hormigón compactado: causas y remedios*. Prof. C. Kraemer. Mayo 1996.

(7) *Planta ART: Asphalt Recycling Travelplant*. Marini 220. ■

Diego Morillo Rocha. Jefe de la Unidad de Carreteras de Zamora. Ministerio de Fomento.

Carlos Gasca Allué. Vicepresidente de ALDESA CONSTRUCCIONES, S.A.

Tabla nº1 Características de la mezcla antes y después del reciclado

Características	Antes del reciclado	Después del reciclado
Estabilidad (kgf)	2279	3251
Deformación (mm)	2,45	2,72
Densidad (t/m³)	2,16	2,30
% betún	4,08	5,36
Relación filler/betún	1,84	1,67

Tabla nº2 Ensayos de fatiga de la mezcla reciclada (testigos)

Muestra espesor p.k.	Densidad t/m³	Módulo (E) MPa	Deformación cíclica (E _s) µdef
1 (12-14 cm) p.k. 68,580	2,35	11 000	123
2 (5-6 cm) p.k. 67,904	2,26	8 200	117

Tabla nº3 Análisis de la regularidad superficial Valores del IRI (mm/m)

Tramo	Capa reciclada		Capa de rodadura	
	Media	Desviación típica	Media	Desviación típica
p.k. 52,0 - 70,0	2,02	0,47	1,37	0,35
p.k. 70,0 - 104,0	1,77	0,54	1,18	0,32