

ASFALTO

Y pavimentación

Número 25 · Volumen VII · Segundo trimestre · 2017

número **25**



Número especial

Monográfico sobre
conservación y emisiones



CARRETERA A ESTRENAR CADA DÍA

En Cepsa queremos cuidar y conservar las carreteras siempre en perfecto estado. Por ello, disponemos de una amplia gama de betunes convencionales, desde la Gama ELASTER de última generación en betunes modificados con polímeros, hasta masillas sellantes.

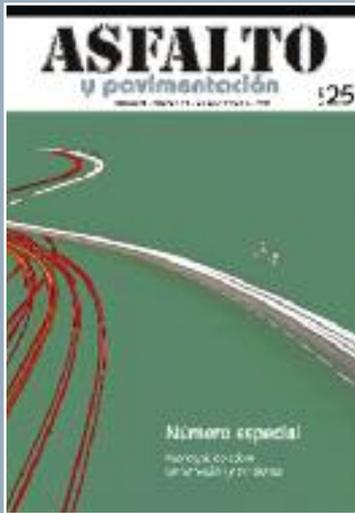
Mantener las carreteras es fácil con los Asfaltos de Cepsa.

Más información en el **91 265 47 13** o en cepsa.com/asfaltos



CEPSA

Tu mundo, más eficiente.



Número 25 · Volumen VII
Segundo trimestre · 2017

ASFALTO Y PAVIMENTACIÓN

Director

Juan José Potti

Comité de Redacción

Andrés Costa, Jesús Felipo,
Jacinto Luis García Santiago,
Lucía Miranda, Jorge Ortiz,
José Luis Peña, Nuria Querol,
María del Carmen Rubio,
Ángel Sampedro, José Antonio Soto,
Miguel Ángel del Val

Secretario

Andrés Pérez de Lema

Coordinador

José Carlos Cámara

Secretaría

Lies Ober

Editorial Prensa Técnica, S. L.

Castiello de Jaca, 29 3º Puerta 2
28050 Madrid
Tel. 91 287 71 95
Fax 91 287 71 94
Directo 629 877 460
www.asfaltopavimentacion.com
asfalto@asfaltopavimentacion.com

Suscripción anual (4 números)

España: 10 €
Extranjero: 12 €

ISSN: 2174-2189
Depósito Legal: M21967-2011

Prohibida la reproducción, total o parcial,
de los contenidos aparecidos en esta
publicación sin previa autorización
por escrito.

Las opiniones vertidas en esta revista
son de responsabilidad exclusiva
de sus autores, sin que Editorial Prensa
Técnica, S. L. los comparta
necesariamente.

Sumario

Número 25 · Volumen VII · Segundo trimestre · 2017

Editorial Especial número 25	05
Tribuna Alberto Bardesi	07
Tribuna Celso Reinaldo Ramos	09
Tribuna Felipe Nougues	13
Tribuna Jean-Claude Roffé	15
Tribuna Luis Carlos Ramírez	17
Mezclas bituminosas recicladas semicalientes con espuma de betún José Ramón López Marco, Jesús Felipo	19
Consideraciones sobre el diseño de rehabilitaciones estructurales de firmes mediante técnicas de reciclado en el contexto de la norma 6.3 IC Alberto Bardesi, Miguel Ángel del Val	29
Buenas prácticas para la puesta en obra de mezclas bituminosas Andrés Costa	39
Mezclas templadas con reutilización del RAP con tasa alta y tasa total. Aplicación, experiencias reales y resultados Jacinto Luis García Santiago, Francisco José Lucas Ochoa	47
Captación de energía solar térmica mediante pavimentos asfálticos Christian Cortés	63
Captación de energía en la carretera mediante transductores piezoeléctricos Antonio Pérez Lepe	71
Secciones fijas Calendario, Lecturas comentadas, Afirmaciones asfálticas	83



1/4 de obra es obra nuestra

Quien está acostumbrado a acometer grandes proyectos sabe que confiar en Galp Energía significa tranquilidad al respecto de una parte de su obra. Desde los combustibles y el fuelóleo pasando por los betunes, Galp Energía garantiza un servicio y un acompañamiento técnico orientado al cliente y sin errores en los momentos críticos. Una seguridad que sólo alguien que está cerca del cliente puede ofrecer. Use nuestra energía y manos a la obra.

Tel.: 91 714 67 00 - Fax: 91 714 68 71 - E-mail: buzon.espana@galpenenergia.com



Especial número 25

No es casualidad que, un 25 de mayo de 2010, coincidiendo con la celebración de las VI Jornadas de Asefma, se presentara el primer número de esta revista.

En medio de la mayor crisis económica en los últimos 75 años, un grupo de notables del sector emprendió la aventura de fundar la revista Asfalto y Pavimentación.

Con una ambiciosa línea editorial, basada en la independencia, calidad y rigor, este ariete de lo negro ha servido como herramienta para actualizar conocimientos, confrontar ideas y debatir.

En el peor escenario posible para el sector de la carretera, Asfalto y Pavimentación fue capaz de establecerse con solidez. En este tiempo, nuestro medio se han situado como uno de los grandes referentes mundiales entre las revistas de esta industria en habla hispana.

A lo largo de los primeros años de este siglo fue forjándose la revolución digital, a la que nuestra publicación ha sabido adaptarse desde el principio. Para ampliar su difusión, se ha apoyado en sus ediciones digitales, disponibles en la web www.asfaltoy pavimentacion.com. Las cifras de descargas, que superan las 10.000 por edición, reafirman lo acertado de este proyecto. De forma adicional, ello ha permitido acceder a un importante número de lectores en Iberoamérica. Paralelamente, el grupo de LinkedIn Asfalto&Pavimentacion ha mantenido también un fuerte ritmo de crecimiento, y hoy alcanza los 975 miembros.

El equipo de Asfalto y Pavimentación puede presumir de haber conseguido el reconocimiento del sector, sin haber renunciado a los principios con que se planteó en su nacimiento.

Por este motivo, y a modo de homenaje, recogemos en este número una selección de los mejores artículos que hemos publicado en relación con la sostenibilidad en carreteras. Coincide con la temática elegida para esta XII Jornada de Asefma, 'Impacto de la conservación de carreteras en las emisiones de CO₂', en la que, nuevamente, distribuimos nuestra revista.

Este éxito ha tenido nombres y apellidos. El de todos aquellos que nos han acompañado desde el principio en

nuestra andadura de forma desinteresada. Nos referimos a los miembros del primer Comité de Redacción (Alberto Bardesi, Andrés Costa, Jesús Felipe, Lucía Miranda, Jorge Ortiz, Anna París, Juan José Potti, Nuria Querol, Baltasar Rubio, José Antonio Soto, Miguel Ángel del Val), a los que se han ido añadiendo nuevos profesionales del sector, como Jacinto Luis García Santiago, José Luis Peña, María del Carmen Rubio y Ángel Sampedro. Continuamente van entrando nuevas figuras destacadas del sector, siempre elegidas en virtud de su trayectoria profesional.

En estos 25 números hemos recogido cerca de 70 artículos técnicos. Muchos de ellos han sido elaborados por los anteriores, pero también se les ha unido una larga lista de personas que han querido transmitir su experiencia profesional y hallazgos técnicos en la materia. Conviene recordar que la nuestra es una publicación abierta a expertos de cualquier país, y todos están invitados a participar mediante el envío de artículos técnicos para su publicación.

No podemos olvidar a los patrocinadores, que con su apoyo hacen posible que, número a número, sigamos saliendo a la calle.

Por supuesto, agradecemos a la organización Asefma que durante todo este tiempo nos haya prestado sus instalaciones, su personal y su prestigio para lanzar este proyecto.

Y como no podía ser de otra forma, gracias a todos ustedes, que nos leen y demuestran que el sueño con el que nos despertamos aquel 25 de mayo de 2010 era el comienzo de una gran amistad.

1988 - 2013
25 AÑOS

VIATOP®

El "Pellet".

Liderando las SMA desde 1988



RETENMAIER IBÉRICA
S.L. Y CIA. S. COM.



Fibras diseñadas
por la naturaleza

Una compañía del grupo JRS

C/ Travesera de Gracia, 56, 2º2ª
08006 Barcelona

Tel: 933 262 880 • Fax: 933 262 897

www.jrsiberica.com • info@jrsiberica.com

Durabilidad y Prestaciones, pareja de ases en los firmes de carreteras



Alberto Bardesi

Director de ATC-PIARC

 @AlbertoBardesi

Que una publicación técnica tan especializada como *Asfalto y Pavimentación* alcance sin fallo sus 25 primeros números no la coloca, probablemente, en el “top ten” mundial pero, desde luego, representa un hito que celebrar. Espero y deseo que a esta celebración le sigan otras, muy especialmente, la del número 101, que deberá coincidir con el 25 aniversario de la publicación. Si las cosas siguen como hasta ahora, esto ocurrirá allá por el segundo trimestre de 2036. Así que me apunto desde ahora mismo.

Destacaré dos características que, en mi opinión, adornan a la revista. Por un lado, sus contenidos responden a los objetivos que nos marcamos quienes, junto a su director y su editor, compartimos el inicio de su andadura desde el Comité de Redacción: difusión de la tecnología, apoyo a la innovación, información de interés y, lo más difícil, opinión seria sobre cualquier tema que afecte al sector. Por otro lado, un diseño estéticamente acertado y sostenible, al menos en mi opinión, mucho trabajo de preparación y algún que otro mínimo retoque, han hecho posible que la revista llegue a este número 25. De alguna manera, estas dos características nos hablan de las Prestaciones y de la Durabilidad de *Asfalto y Pavimentación*. Es precisamente a la importancia de las prestaciones y a la durabilidad de los firmes de las carreteras a los que quiero dedicar esta tribuna.

En una de las tribunas del número 24 de la revista, “*Pavimentación 4.0*”, firmada por Ángel Sampedro, se analiza uno de los temas que más interés despierta en los últimos años: la sostenibilidad de las carreteras. Por su parte, en el editorial “*Camino a la descarbonización de la sociedad*” se incidía en la importancia de tener los firmes en buen estado

para prevenir un exceso de emisiones. Sobre la necesidad de reducir los costes de construcción y conservación no parece que haya que insistir demasiado, máxime en la situación que viene soportando el sector en los últimos diez años. Resumiendo: eficiencia, economía y sostenibilidad. Pues bien, mi reflexión es que, cuando se quieren tener carreteras económicas, eficientes y sostenibles, una parte fundamental del éxito se basa en conseguir firmes duraderos y con buenas prestaciones.

Al hablar de prestaciones, me refiero a las demandas de los usuarios; básicamente, capacidad, seguridad y comodidad. Dejaré la capacidad al análisis de los expertos en diseño geométrico y en el comportamiento de los conductores. Pero sí señalaré que el estado del firme puede tener una influencia significativa en la pérdida de capacidad cuando su nivel de deterioro es considerable. Por tanto, un primera llamada a la importancia de la durabilidad.

Seguridad y comodidad. Demandas del usuario que los técnicos traducimos en trazado, regularidad superficial y resistencia al deslizamiento (macro y micro-textura). Un planteamiento clásico al que, desde hace unos años, hemos incorporado la conveniencia de una baja sonoridad y, más recientemente, el de una reducción en el desgaste de los neumáticos. Hablamos, de nuevo, de economía y de medio ambiente: menos consumos de combustible, de neumáticos, de elementos mecánicos. Y no digamos nada si hablamos de seguridad.

Durabilidad. Nada hay que impacte más en la economía y en la sostenibilidad de una carretera que la durabilidad de un firme. Un firme bien diseñado y bien ejecutado, que mantenga durante muchos años sus características prestaciones dentro de un rango adecuado, es lo más barato y lo más sostenible que puede hacerse. No creo que sea necesario enumerar toda la suerte de desgracias que conlleva un firme en mal estado y los costes, tanto económicos como ambientales, que supone la necesidad de una prematura rehabilitación. La falta de durabilidad es, con toda seguridad, uno de las mayores fuentes de Insostenibilidad.

Hay que destacar la influencia decisiva y la relación que la regularidad, supuestamente una característica “sólo” superficial, tiene en la durabilidad y el estado estructural. El brutal aumento del impacto de las cargas por el efecto dinámico que se produce en un pavimento en malas condiciones provoca que firmes bien dimensionados no alcancen ni el 25% de su vida de servicio por un mala regularidad inicial. De igual forma, la aparición de deterioros en el pavimento se pone de manifiesto con un empeoramiento del IRI que, por tanto, se configura como indicador indirecto, pero muy significativo, del deterioro del firme. Tan es así, que el IRI es considerado por algunas administraciones como el principal criterio para la recepción de obras y la aplicación de bonificaciones y penalizaciones al contratista.

La cuestión es, por tanto, ¿por dónde deben ir los diseños de firmes para maximizar prestaciones y durabilidad sin costes excesivos? ¿Qué tipo de materiales deberíamos usar?

Si nos ceñimos al objeto de esta revista, los firmes asfálticos, la solución debería enfrentarse con éxito a los fallos / deterioros que se presentan en las carreteras con este tipo de firmes y que dan al traste con su durabilidad: fisuración por fatiga, fisuración descendente, fisuración térmica, fisuración reflejada, fisuración por envejecimiento, deformación acumulada y degradaciones superficiales. Esto requiere la combinación de un buen cimiento, una sección estructural potente y una rodadura de altas prestaciones que sea poco crítica desde el punto de vista mecánico. Y en esencia, esto es lo que se ha dado en llamar un “Perpetual pavement” que aquí hemos traducido por pavimento de larga duración.

No resultaría pertinente entrar ahora en una descripción pormenorizada, pero quizá sí señalar algunas consecuencias que llevaría aparejado este enfoque, al menos cuando nos referimos a los tráfico medios y pesados (los tráfico ligeros deben tener su propio enfoque). Tendríamos que pensar en ser aún más estrictos con las explanadas (obligar a E3 hasta T2 y no permitir la E1 salvo excepciones en T42), fomentar el empleo de secciones tipo 2 (SC+MB) obligando a prefisurar en todos los casos, fomentar el empleo de las mezclas MAM y eliminar las de tipo G... En fin, es un tema que da para la reflexión y el debate.

Respecto a las altas prestaciones de la capa de rodadura, el avance de calidad de los últimos 30 o 40 años es inquestionable. Quizá el más significativo ha sido el de compaginar altas macrorrugosidades y, por tanto, buenas

resistencias al deslizamiento y mejores propiedades ópticas, con una baja sonoridad y, por tanto con mayor comodidad de usuarios y colindantes, a través de las mezclas con textura negativa (PA, BBTM, SMA...). Pero debemos seguir dando pasos. Uno de ellos sería el de la reducción de consumos y el desgaste de neumáticos. Ya sabemos que la regularidad es un factor básico, pero ¿pueden nuestras rodaduras contribuir también a ello? Muy probablemente sí a través de la reducción de los tamaños máximos de árido, un tema que no hemos explorado demasiado pese a las informaciones favorables que nos llegaban de otros países. Hacer mezclas PA y BBTM con tamaños 5 o 6 mm parece ya claro que no supone una reducción de la seguridad y, además, contribuye bastante a la reducción de ruido. Si, además, buscamos una reducción de espesores, y de costes obviamente, a través de las “nuevas” mezclas ultradelgas (AUTL), estaremos dando un nuevo paso en la mejora de las prestaciones. En cualquier caso, hay que añadir que algo imprescindible para el sector, de cara a seguir progresando en este campo, es la colaboración con los fabricantes de vehículos y de neumáticos. Algo que desgraciadamente es poco habitual.

Para terminar con las prestaciones de nuestras carreteras, una idea básica a tener siempre presente en nuestras decisiones y actuaciones: la Previsibilidad. Nuestras carreteras deben ser previsibles y las singularidades, permanentes o no, deben estar perfectamente señalizadas. Criterio básico para la seguridad.

Con todo ello, estoy en condiciones de darle un tema de trabajo al director de esta Revista, algo que le apasiona: el indicador mediático de las carreteras. No puede ser otro que la “CONDUCIBILIDAD”. Pero de esto hablaremos en otro momento.

Manutenção de pavimento asfáltico com foco na sustentabilidade



Eng. Celso Reinaldo Ramos

Coordenador da Comissão de Asfalto do IBP
Secretário Permanente Adjunto do CILA
Vice-Presidente da AILA

 @Ramos16171924

A função de um pavimento é permitir aos usuários um transporte seguro e confiável durante a sua vida útil de serviço. Devido às ações do tráfego e do meio ambiente, os pavimentos sofrem um processo de deterioração com o tempo, que é bastante agravado quando sua manutenção não é feita de maneira adequada. A deterioração do nível de serviço (ou serventia) dos pavimentos afeta diretamente as condições de segurança, conforto e tempo de viagem dos usuários, além de elevar drasticamente o custo operacional dos veículos, relacionado com o consumo de combustível, óleos, peças, pneus, depreciação, etc.

A falta de manutenção oportuna acarreta a necessidade de medidas de manutenção emergenciais, não só mais complexas como também de maior duração da interferência, contribuindo para o agravamento do caos no trânsito, bem como para o aumento do custo dos serviços. Esta questão torna-se ainda mais relevante nos principais Corredores Estruturais, devido às características peculiares do tráfego, tais como, pesado, intenso e canalizado, e por desempenharem um papel estratégico em termos sociais e econômicos. A falta de condições adequadas da superfície de rolamento influi negativamente no sistema como um todo, neutralizando o efeito positivo, de outras ações de gerenciamento do tráfego desencadeado pelo Poder Público.

As atividades de recuperação e manutenção dos pavimentos requerem um planejamento detalhado das ações viárias e também um diagnóstico com embasamento técnico, de forma a garantir a racionalização e a otimização dos recursos públicos, bem como a durabilidade dos serviços e o elevado padrão de rolamento dos pavimentos. As consequências da falta de planejamento e de um criterioso diagnóstico dos pavimentos estão associadas às operações



Fotos de Vias com Restaurações tipo Tapa-Buracos.

Durabilidad y Prestaciones, pareja de ases en los firmes de carreteras

“tapa-buraco” contínuas e de elevados custos de recuperação e manutenção, tornando ineficientes as ações viárias públicas e prejudicando o padrão de conforto e segurança dos usuários.

No caso do Brasil, que é um país com predominância rodoviária, o transporte rodoviário de cargas representa cerca de 60 % e de pessoas da ordem de 95 %. Evidente, que países que possuem um modal rodoviário de significativa relevância, a preocupação com a manutenção dos pavimentos deve estar sempre entre as principais linhas de atividades dos administradores públicos.

A pesquisa mais recente do estado das rodovias brasileira foi divulgada pela Confederação Nacional de Transporte, CNT, em 2016, onde foram avaliados cerca de 103.259 quilômetros de rodovias federais e estaduais pavimentadas, em todo o país. O resultado desta amostragem revelou que 49.898 km (48,3% da Extensão Total avaliada) tem algum tipo de problema no pavimento, sendo 35,8% classificados como regular, 9,9% como ruim e 2,6% péssimo. Entretanto, os 45.876 km (44,5% da extensão) encontrava-se em ótimo estado de conservação e 7.485 km (7,2%) Bom. Destaca-se que os 45,5 % de pavimento em estado ótimo ou bom encontravam-se em grande parte em vias pedagiadas.

Portanto, já se verifica que entorno de 50 % da malha avaliada necessita de medidas rápidas de intervenção, pois

os custos de manutenção se forem postergados se agravaram, sem desconsiderar problemas relativos a falta de segurança, de conforto e também outros custos indiretos de manutenção e tempo maior para deslocamento.

Este ponto merece uma reflexão dos administradores, pois se o sistema principal de um país é o modal rodoviário, tornasse um contrassenso deixar os pavimentos se deteriorarem, sem uma manutenção adequada. Tornando uma bola de neve cada vez maior, que vai exigir mais e mais investimentos e operações de restauração mais profundas.

Com relação às técnicas de manutenção se faz necessário que os técnicos rodoviários busquem formas sustentáveis com a visão econômica, de reaproveitamento de matérias e que esteja em sintonia com meio ambiente.

Atualmente os desenvolvimentos dos produtos e processos são voltados principalmente para o meio ambiente, saúde, segurança e a economia de energia, sem perder o foco no aspecto técnico. Não é muito simples conciliar esses aspectos, porém, por necessidade de alterar a conduta do homem com meio ambiente, o apelo ambiental tem sido bastante valorizado. Ao se pensar no meio ambiente através de técnicas de reciclagem, geração de energia não poluente, redução na emissão de gases para atmosfera e maior durabilidade dos serviços, os projetos, em sua grande maioria, vêm apontando para melhoria de produtos ou processos. Na área de asfalto, essa tônica também é verdadeira e



Figura da Classificação do Estado do Pavimento Avaliado (fonte: Pesquisa da CNT Rodovias de 2016).

tem tomado vulto nos países de maior desenvolvimento tecnológico.

No Brasil, historicamente as conservações das vias, por problema cultural, ocorriam predominantemente pelas operações tapa-buraco ou por reposição de massa asfáltica sem estudo prévio da estrutura e da solução de restauração adequada. Com advento das concessões das rodovias e estudos de pesquisas das universidades, novas tecnologias tornaram correntes trazendo melhorias marcantes na qualidade dos pavimentos, principalmente, nas vias concessionadas. Despertando nos usuários, quando comparando com outras vias não pedagiadas, certo desleixo da Administração Pública em não conseguir manter no mesmo nível de qualidade as rodovias não concessionadas.

Destaco, em razão de ter acompanhado no período de 2010 a 2014, que administração pública começou a reagir e quebrando esta inercia. Iniciando operações de grande vulto de manutenção, definidos com base em critérios técnicos e metodologias de caráter normativas. Procurou-se ainda incorporar nas soluções novas tecnologias de ponta, com o objetivo de garantir durabilidade aos serviços e maiores relações entre os benefícios e custos associados. Foram realizados cadastros dos pavimentos e o diagnóstico das condições estruturais e funcionais dos mesmos. A partir destes levantamentos, os pavimentos estudados sofreram retroanálise e foram definidas as intervenções de recuperação das vias.

Com base nos parâmetros e índices assim definidos, foram analisadas distintas alternativas para recuperação do sistema viário procurando-se incorporar materiais e serviços que constituem tecnologias avançadas e duradoras, de forma a garantir a eficiente aplicação dos recursos públicos.

As técnicas de maior relevância durante está manutenção são a seguir destacadas:

- As usinas que fabricavam misturas asfálticas deveriam utilizar sistema de queima a gás. Visando maior eficiência do processo e menor poluição ambiental.
- Sistema antirreflexão de trincas, com emprego de geogrelhas, de fácil execução, que permitem reciclagem futura, retardadoras de propagação de trincas e que auxiliam na condição estrutural, em alguns casos com redução de espessura de reforço da ordem de 30 %.
- Misturas asfálticas a quente recicladas para camada intermediária, que além de conterem RAP deveriam utili-

zar como ligante o asfalto borracha. Atuando de forma ambientalmente correta, com aproveitamento de matérias nobres, existentes na fresagem ou no RAP, como os agregados e ligante do revestimento antigo. Reduzindo a exploração de jazidas minerais e o destino do petróleo para produção de asfalto. Trazendo economias marcantes na produção das misturas asfálticas a quente, além dos benefícios ambientais e técnicos que são largamente divulgados na literatura técnica para o asfalto borracha.

- Na camada final de revestimento as misturas asfálticas a quente utilizaram também material oriundo da fresagem, ou seja, RAP. Foram utilizadas granulometrias contínuas e descontínuas visando avaliar melhorias quanto a deformação permanente. Em razão de temperaturas elevadas observadas na superfície do pavimento, da ordem de 700 C, utilizou-se ligante polímero de ponto de amolecimento superior a 80°C e emprego de aditivo de mistura morna. As misturas asfálticas foram produzidas a 150°C e espalhada e compactada entre 140 a 110°C. Além do ganho econômico do emprego de menor temperatura de processo, foi verificada redução relevante nas emissões de gases, que reduz os efeitos da poluição atmosférica, e também minimizando a exposição dos operários as elevadas temperaturas e aos gases emitidos pela mistura asfáltica.
- Vias em boas condições estruturais e com desgaste superficial sofreram intervenções rápidas e de menor custo, com emprego de microrrevestimento asfáltico a frio com emulsão contendo asfalto polímero.

As operações de restaurações trouxeram melhorias relevantes ao trânsito, dando conforto, reduzindo o tempo de viagem e de acidentes, além de trazer credibilidade da administração pública.

Quanto ao aspecto econômico foi elaborado estudo de viabilidade econômica, onde a seguinte premissa foi assumida. Com base em operações de serviço de tapa-buraco tem se verificado que a vida útil, quando bem realizado, tem duração máximo 6 meses e uma restauração com as técnicas que foram elencadas foi projetada para intervenção após 8 anos. Com base nos custos de todos os serviços foi verificado que em 2 anos a intervenção de manutenção correta já apresentava um equilíbrio financeiro. Não foram considerados outros aspectos técnicos como conforto e segurança.

Durabilidad y Prestaciones, pareja de ases en los firmes de carreteras



Fotos durante a execução e após conclusão.

Várias vias restauradas já apresentam 7 anos em serviço, em bom estado superficial do pavimento, revelando uma economia fantástica. Também se preocupou em desenvolver um programa de gestão de pavimento, de maneira a permitir a administração pública intervir no momento certo com o menor custo possível.

Em linhas gerais, comprovou-se que é possível atuar na manutenção dos pavimentos atendendo aos aspectos de sustentabilidade, empregando técnicas modernas que asseguram durabilidade, economizando a curto prazo, e atendendo os aspectos de saúde e meio ambiente.

Referências

- Asfalto em Revista do IBP, Edição 08, Nov/Dez de 2008.
- XVI CILA, Ramos, C e outros, IBP2449_11 – Programa Asfalto Liso na Cidade do Rio de Janeiro. 2011.
- Pesquisa CNT de 2016 de Rodovias, <http://pesquisarodovias.cnt.org.br/>

#55

AFIRMACIONES ASFÁLTICAS

“Un firme en mal estado aumenta las emisiones de GEI del tráfico. Las mezclas asfálticas permiten repararlo de un modo fácil, rápido y eficiente” (EAPA-Road pavement industries highlight huge CO2 savings)

#SOSTENIBILIDAD_Y_MEDIO_AMBIENTE

¿Llegó la hora?



Felipe Nogués

Secretario permanente del CILA

 @nouguesfelipe

A fines de 2015 compartimos la tribuna con los lectores de Asfalto y Pavimentación (Número 19), haciendo una reseña histórica de la evolución del Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto (CILA).

Cerramos aquella columna con el anhelo y el convencimiento de que caminamos hacia un futuro mejor y plagado de desafíos, muchos de ellos conocidos y otros tantos inimaginables. Como inimaginables eran, hasta hace pocos años, muchas de las problemáticas que actualmente enfrentamos y debemos resolver.

Independientemente del grado de desarrollo que cada país o región tengan, la necesidad de disponer de redes viarias es un común denominador.

Podremos discutir el nivel de transitabilidad que se necesita para una vía, sus respuestas estructurales o funcionales, su capacidad de satisfacer las demandas, etcétera. Pero lo que nadie discute es que necesitamos caminos.

Desde hace décadas, el poder político ha tomado nota de esta demanda social. Sin embargo, percibimos que responden, salvo honrosas excepciones, a ella más por interés electoral que por visión estratégica.

Nuestros pueblos, mayoritariamente, gozan de sistemas de gobierno donde la voluntad popular elige a quienes les otorga el privilegio de gobernar. Y gobernar no es sólo administrar recursos, sino, y tal vez más importante, preservar el “patrimonio” que nos legaron las generaciones que nos han precedido y las que nosotros, con nuestro aporte, les entregaremos a los que vendrán. Actualmente, y no por casualidad, se ha generalizado el concepto de “patrimonio en infraestructuras” que cada país tiene. Seguramente, el “patrimonio vial” ocupa los primeros lugares, no sólo por su valor económico, sino también por el “espacio público” que ocupan.

Está claro que, a nivel mundial, con excepciones muy aisladas, no estamos pasando por un buen momento. El crecimiento, medido en producción de bienes y servicios, es bajo (nulo en algunos casos) y se hace muy difícil asignar los recursos con criterios de equidad y visión estratégica.

Como hombres y mujeres “inoculados” de asfalto, sabemos que disponemos de un recurso “finito”, que la naturaleza nos “regala”, y que debemos optimizar para que su uso, racional, sea perdurable en el tiempo.

Investigamos e innovamos persiguiendo objetivos claros: hay que hacer más con menos, debemos obtener mayores prestaciones estructurales y funcionales, debemos prolongar la vida útil de nuestros materiales (y asfaltos) y cuando ya no sea posible debemos reutilizarlos para que sigan formando parte de nuestros caminos.

Nuestros CILAS, entre muchos otros beneficios, nos han permitido “ver” cómo el conocimiento “viaja” de generación en generación. El paso del tiempo agiganta el recuerdo y la valoración de nuestros “mayores”. Aquellos, que sin las herramientas que la tecnología pone al alcance de nuestras manos, supieron investigar y avanzar.

Por ello, cada CILA es un nuevo comienzo, una nueva meta y una nueva vara que debemos sortear, cada día más alta y con mayores exigencias.

Hace pocos días, festejamos el excelente resultado que avizoramos para nuestro “XIX CILA”, que se celebrará en Medellín (Colombia) en noviembre próximo.

Más de 370 resúmenes de ponencias anticipan que la convocatoria será exitosa y que hay “sed” por transmitir y recibir conocimientos.

Ahora bien:

- ¿Alcanzan con nuestros Congresos para lograr un efecto positivo y multiplicador en la mejora de nuestros caminos?
- ¿Alcanza con que el conocimiento se transmita y aumente en el ámbito académico?
- ¿Es posible que no seamos capaces de llegar al poder político para hacer saber lo que es posible hacer?
- ¿Es necesario que obliguemos a constructores y empresarios a “valorar y aplicar el conocimiento”?

¿Llegó la hora?

- ¿Los técnicos somos más reactivos que activos?
- ¿Podemos prescindir del uso de las redes sociales como herramientas para llegar a la gente?
- ¿Realmente podemos esperar cambios en los comportamientos si no hacemos cambios nosotros mismos?
- ¿Es necesario que se estimule y premie la innovación?
- ¿Es imprescindible el “politécnico”, el técnico que adquiere formación política?
- ¿Qué piensan nuestros políticos de estos interrogantes?

Está claro y fuera de discusión que los necesitamos, y mucho. Son elegidos por la gente para administrar lo que es de todos. Pero, también, al igual que nosotros, tienen un ciclo finito y luego, lo que hayan hecho (o no) deja su huella, y es imborrable.

Ahora bien, ¿nuestros dirigentes son plenamente conscientes de que el tiempo no vuelve atrás y de que ellos los obliga a estar preparados para cuando les toque actuar?

Nadie, en su sano juicio, puede pretender que alguien esté preparado y sepa “de todo”.

En todo caso, sí podemos pensar que un buen dirigente es alguien que sabe “un poco de todo y mucho de nada”, pero que tiene absolutamente claro dónde y cuándo debe recurrir ante cada necesidad.

Es necesario saber qué respuesta hay a esos interrogantes. Y para ello nos debemos comunicar. Entre nosotros y con los decisores políticos.

¡Seguramente tenemos mucho para decir y para sumar!

¡Seguramente tenemos mucho para escuchar!

¿Llegó la hora?

#41

AFIRMACIONES ASFÁLTICAS

“En la lucha contra el cambio climático, los firmes asfálticos reducen emisiones con mezclas de baja temperatura (semicalientes y templadas)” (Editorial, número 20)

#SOSTENIBILIDAD_Y_MEDIO_AMBIENTE

Asociaciones y revistas técnicas



Jean-Claude Roffé

Vicepresidente de la Federación Europea de la Carretera (ERF)

 @jcroffe

El difícil entorno económico, poco favorable para el gasto público y nuestro negocio, ha incrementado la desaparición de muchas empresas del sector.

Adaptarse a la crisis y gestionar las emergencias se han convertido en prioridades, por lo que el apoyo a las actividades de las organizaciones profesionales como su adhesión a revistas profesionales y su participación en el contenido de las revistas, en un contexto de reducción de los recursos humanos disponibles, se sitúan en segundo nivel.

Sin embargo, en una situación de crisis, las organizaciones empresariales, como es el caso de Asefma, me parecen esenciales y, sin duda, más eficaces y representativas para gestionar, en nombre de todos los actores del sector privado y los administradores de infraestructuras viales, para demostrar la incidencia del sector en el desarrollo de la economía y la movilidad, finalmente, permiten adquirir mayor conciencia de la importancia de los activos viales para impulsar el crecimiento del transporte.

Una organización profesional, debido a la representatividad que posee, constituye un actor creíble para tratar cuestiones de fondo sobre el medio ambiente, la seguridad y la salud ocupacional, la innovación, la implementación de nuevas técnicas, el apoyo a los procesos normativos o aspectos reglamentarios y trasladar la comunicación positiva para inspirar soluciones y establecer caminos para apoyar el negocio, salvar puestos de trabajo y garantizar la movilidad individual y profesional, así como la seguridad vial.

Entre las misiones de las organizaciones profesionales también se incluye el apoyo a la formación y el intercambio de información, ya que resultan necesarias para participar colectivamente en la evolución de la sociedad y la profesión.

Conviene tener en cuenta que las cuestiones más emergentes, la elaboración de hojas de ruta y la emulación, forman parte del ADN de las organizaciones profesionales.

Desde hace mucho tiempo, nuestro negocio ha estado supeditado a las decisiones del estado de bienestar y sus pertinentes doctrinas y políticas de tráfico. Hoy en día, nuestros clientes se han multiplicado, ya que las organizaciones profesionales ejercen su labor de representación ante los órganos de elección, las regiones y los municipios. La necesidad de optimizar el gasto público abre espacios al sector privado para contribuir a una óptima cohesión y a la mejora de las condiciones de vida en los territorios.

En cuanto a las revistas profesionales, el paralelismo es fácil de hacer. Publicaciones como *Asfalto* y *Pavimentación* son la vitrina y la garantía técnica de nuestras actividades. Contribuyen a la promoción de las evaluaciones técnicas, al desarrollo de las doctrinas y a apoyar la innovación, de forma que las empresas y las autoridades en materias de carreteras puedan avanzar accediendo a estos conocimientos.

Por lo tanto, se difunde información para las empresas y las administraciones más allá del mundo académico. Esto da lugar a una tremenda estimulación del *benchmarking* entre las empresas y la gestión de las carreteras.

Asimismo, esta revista establece una fuerte conexión con toda la comunidad de la carretera, de la que forman parte los autores de los artículos que se publican.

Finalmente, los profesionales de la comunicación suponen una extensión a la acción de las asociaciones. Hablar de inversión en carreteras ya no es un tabú.

Si las asociaciones profesionales y revistas no existieran, habría que inventarlos.

Finalmente, me gustaría invitarles al II Congreso PPRS, que se celebrará en Niza (Francia) del 26 al 28 de marzo de 2018 (www.pprs2018.com, @PPRSummit), con el objetivo de analizar la situación del sector de conservación de carreteras, a través de la modernización, la identificación de las mejores prácticas (en términos políticos, económicos, financieros, técnicos y medioambientales) así como de las oportunidades ofrecidas por las nuevas tecnologías y los nuevos servicios para la carretera, compartiendo ideas, experiencias y entusiasmo.

Por esta razón, les invito a marcar este evento en el calendario, confiando en poder encontrarles en Niza el próximo año.



Abrimos paso a nuevas ideas

¿Una carretera que descontamina el aire que respiramos? ¿Residuos domésticos reciclados en áridos para la carretera? ¿Pavimentos que en su fabricación ahorran energía y reducen la emisión de gases? ¿Pavimentos que absorben el ruido del tráfico? Hasta hace poco, estas ideas eran pura ficción. Actualmente ya tienen nombre: Noxepur®, Tempera®, Viaphone®..... y se utilizan diariamente con éxito. Para imaginar carreteras de mañana, creemos en las nuevas ideas, incluso en las más sorprendentes, por eso innovamos.

Ciudades inteligentes: el futuro ya está aquí



Luis Carlos Ramírez

Periodista

En la década de 2050, el 67% de la población mundial vivirá, sobre todo, en las grandes ciudades. Esta impactante predicción de la ONU hace que muchos gobiernos del planeta opten por soluciones innovadoras y convergentes. Una de ellas, transformar las urbes en inteligentes.

Desde Canadá a Singapur, pasando por China, Estados Unidos, América Latina o el continente europeo, cientos de países están desarrollando iniciativas con el adjetivo *inteligente* como sinónimo revolucionario o de transformación. Forman parte del movimiento de las *Smart Cities*, una vorágine de ideas sostenibles, eficientes y tecnológicas que comparten un mismo objetivo: buscar otro modelo de ciudad para hacer la vida ciudadana mucho más confortable y prestar servicios más eficientes.

En España, los municipios en periodo de adaptación a ese futuro que ya está en marcha casi llegan al centenar (Victoria, Madrid, Santander, Barcelona, Málaga, Logroño...) Trabajan por mejorar la eficiencia energética, gestionar los residuos, movilidad, protección del medioambiente y optimizar recursos. En definitiva, la implantación de nuevas soluciones inteligentes aplicadas a las personas, tanto en educación como en salud, cultura, deporte, accesibilidad, etc.

Dos son los factores que facilitan esta trascendental metamorfosis que lleva años en aplicación: la aparición de nuevos materiales y el potencial de la sensorización: el mundo de los sensores puede revolucionarlo todo y son aplicables a ciudades, infraestructuras, edificios, hogares, procesos... La tecnología que puede hacer una ciudad más eficiente y habitable abarca desde el uso de nuevos materiales o formas de energías a la digitalización. La cantidad

ingente de información recabada por los dispositivos hacen el resto.

La creación de nuevos materiales artificiales, especialmente los vinculados a los avances en el mundo invisible de la nanotecnología, pueden revolucionar nuestro bienestar. No dejan de aparecer creaciones como el aerografeno (el material más ligero del mundo), la upsalita (muy absorbente) o la espuma de titanio (material altamente resistente y ligero).

Pese a las limitaciones, la nanotecnología propicia innovaciones revolucionarias como los nanotubos, el grafeno u otros materiales similares a base de polímeros, que permitirían a medio plazo la autorreparación de carreteras o edificios; pinturas que absorben contaminantes, vehículos con materiales resistentes a los golpes, ropas que repelen la suciedad o las bacterias, componentes eficientes para los productos digitales como las pantallas flexibles. Junto a estos elementos, la computación y el Internet de la cosas propician, además, edificios o tejidos inteligentes con prestaciones de gran valor para los usuarios.

Para completar el círculo, la impresión 3-D ya hace posible la fabricación de una vivienda en China en pocas horas o que los pedidos se impriman en casa en vez de llegar en dron. Las aplicaciones médicas de esta última tecnología son tan espectaculares como eficientes: prótesis ortopédicas, reconstrucción de huesos, audífonos (el 98%), válvulas aórticas, tejidos humanos (piel), etc.

La nanotecnología propicia innovaciones revolucionarias: polímeros que permitirían la autorreparación de carreteras o edificios; pinturas que absorben contaminantes, vehículos con materiales resistentes a los golpes, ropas que repelen la suciedad o las bacterias...

Singapur: el mayor laboratorio del mundo

Si hay una ciudad-estado a la que aplicar el calificativo inteligente, sin duda, es Singapur, el país más pequeño del Sudeste Asiático, donde reina la eficiencia y es símbolo de modernidad.

La metrópoli con el metro cuadrado más caro del orbe es un paraíso empresarial que alumbró más de 30.000 *startups* en la última década. El Estado donde tirar la basura a la calle se multa con 1.300 euros y la vergüenza de llevar un cartel que reza *Soy un guarro* es, a la vez, un verdadero semillero de apps, robótica universalizada, niños que juegan con drones y vehículos autónomos sin conductor.

Es también uno de los nodos de inversión más importantes del planeta. Por sus calles, más de 40.000 jóvenes portan sensores en la ropa que indican la temperatura corporal, previsiones de lluvia o las rutas más despejadas. Los niños juegan con drones en escuelas donde aprenden a programar videojuegos. En 50 años, esta isla ha doblado el PIB per cápita de España. Su capital, se convirtió en la primera ciudad del mundo en introducir taxis inteligentes que funcionan sin conductor. Estos taxis representan un 3% del parque móvil y cubren el 18% de los trayectos. Monitorizado por más de 1.000 sensores, el millón de coches que circula por Singapur es gestionado con datos recolectados en tiempo real. Cuando el tráfico es fluido no hay peaje, pero cuando está congestionado, se activa.

Tree House es una urbanización residencial con bloques de 24 pisos. Se trata del jardín vertical más grande del mundo. Sus espectaculares *Gardens by the Bay* son una muestra de sostenibilidad, arquitectura innovadora y última tecnología en un ambicioso proyecto con excelentes resultados. Los "superárboles" regulan la temperatura absorbiendo y

Singapur, la ciudad-estado del sudeste asiático es el mayor laboratorio del mundo. 40.000 jóvenes portan sensores que indican la temperatura corporal, previsiones de lluvia o las rutas más despejadas. Fue primera ciudad en introducir taxis inteligentes sin conductor

La movilidad de las personas y la vida urbana va a cambiar de forma radical. Un ejemplo será la automoción con la proliferación de coches híbridos y el automóvil volador: seis empresas de EE.UU, Alemania y China prueban con éxito distintos prototipos de despegue y aterrizaje vertical

dispersando calor, recolectan agua de lluvia y ofrecen una vista panorámica de la ciudad. Sus granjas verticales permiten cultivar hacia lo alto ahorrando energía.

Lo que viene: el coche volador

En el resto del mundo, pocos dudan que la movilidad de las personas y la vida urbana va a cambiar de forma radical en las próximas dos décadas. Un ejemplo de ello será la automoción, con la proliferación de coches híbridos y el automóvil volador: al menos seis empresas de Estados Unidos, Alemania y China prueban con éxito ya distintos prototipos de despegue y aterrizaje vertical.

La empresa alemana **Lilium Aviación** desarrolla el primer avión del mundo para uso personal. Se adelanta a sus rivales en la carrera hacia el pionero de los 'coches voladores': un biplaza (VTOL) que puede alcanzar 300 km/h y mantenerla durante una hora en una sola carga de baterías. El vehículo/aeronave puede flotar y realizar vuelos cortos. La prueba allana el camino para crear el primer taxi aéreo.

La compañía Uber, por su parte, espera llevar los coches voladores a las ciudades en menos de cinco años. Dubái será la primera ciudad en contar con este sistema en 2020. Antes llegarán más pruebas: Primero coche compartido, después sin conductor, con los que ya experimentan y podrían reducir un 90% la cantidad de automóviles de las urbes. Los argumentos son tanto ecológicos como económicos. El 22% de las emisiones de CO₂ del planeta provienen de la automoción. A la vez, los coches están parados el 95% del tiempo.

Mezclas bituminosas recicladas semicalientes con espuma de betún

José Ramón López Marco, jrlopez@pavasal.com

Jesús Felipe Sanjuán, jfelipo@pavasal.com

José Berbis Latorre, jberbis@pavasal.com

Pavasal

José Ramón Albert García, jralbert@pavasal.com

Alberto Moral Quiza, albmor@cartif.es

Pavasal

Cartif

Desde hace varios años en nuestro país las Mezclas Semicalientes han formado parte de una multitud de publicaciones técnicas en el marco de las mezclas bituminosas. Pero desafortunadamente, pese a los beneficios ambientales que pueden producir, no ha sido posible su introducción de una forma mayoritaria en el mercado y las experiencias reales realizadas en obra se encuentran generalmente bajo los paraguas de los proyectos de investigación que las han estado estudiando.

La presente comunicación fija el punto de atención sobre la técnica de Mezclas Semicalientes basadas en la espuma de betún, exponiendo los resultados obtenidos en las experiencias realizadas hasta el momento, en las cuales se ha combinado el espumado de betún con las técnicas de reciclado de fresado obteniendo "Mezclas Recicladas Semicalientes". Al mismo tiempo se realiza el análisis medioambiental utilizando la herramienta del ACV (Análisis del Ciclo de Vida).

Palabras clave: mezcla bituminosa, mezcla bituminosa semicaliente, mezcla betún espumado, mezcla betún espumado reciclada, rampa de espumación, ACV

Warm Mixes (WMA) have formed a part of a multitude of technical publications in the bituminous mixes framework for several years in Spain. Unfortunately, despite the environmental benefits that they to produce, their inclusion has not been normally possible in civil works and tests carried out were under the umbrella of the research projects.

The paper points out one technology of WMA, based on the production of bitumen foam. The results obtained, combining foam bitumen technology with reclaimed asphalt, "Reclaimed Warm Mixes ", will be shown.

In the end, the results of the environmental analysis of the mix of both technologies using the LCA technique (Life Cycle Assesment) will be shown.

Keywords: hot mix asphalt (HMA), warm mix asphalt (WMA), foam mix asphalt, foaming ramp, LCA

1. Introducción

En los últimos años se han producido gran cantidad de publicaciones y jornadas técnicas que se han dedicado a exponer los resultados y bondades de las mezclas fabricadas a baja temperatura con lo que parece que queda poco por añadir sobre este

tema. Pero pese a que disponemos de toda esta información, el porcentaje de utilización real de estas técnicas es muy bajo y no acaba de salir del círculo experimental que lo ha iniciado. El extendido de este tipo de mezclas se encuentra casi siempre supeeditado a las experiencias en obra realizadas por los diferentes grupos de investigación que las han desarrollado.

Mezclas bituminosas recicladas semicalientes con espuma de betún

Con la publicación del nuevo PG-3 se abre de forma explícita la puerta a la utilización de mezclas semicalientes. Son ahora los fabricantes los que deben adaptar sus procesos productivos para conseguir hacer realidad la incorporación de esta técnica.

Así, existe un gran abanico de posibilidades técnicas desarrolladas para obtener una reducción de la temperatura en las mezclas bituminosas, multitud de opciones semicalientes para elegir que generalmente se pueden clasificar en dos grandes grupos:

- Las mezclas semicalientes sin agua, que se basan en la incorporación de aditivos, ya sea químicos o ceras. Los primeros actúan sobre las características reológicas en la interfase betún-árido y las segundas modifican la viscosidad del betún a diferentes rangos de temperatura.
- Las mezclas semicalientes con la adición de pequeñas cantidades de agua, que producen la espumación del betún. Entre ellas destacan la adición al mezclador de filler hidrofílico como las zeolitas, áridos parcialmente húmedos o la generación de espuma de betún por la incorporación directa de agua.

Muchas de estas técnicas (sobre todo las que implican aditivos) han sido probadas con éxito en nuestro país con la excepción de las técnicas de espumado directo del betún que pese a ser una técnica antigua (años 50), sin embargo, no ha tenido gran repercusión en Europa (se han realizado algunas obras con reciclado en Noruega, Gran Bretaña y Países Bajos), aunque han sido bastante utilizadas en países como Sudáfrica, USA o Canadá.

2. Mezclas Semicalientes espumadas

El proceso de espumado de betún es una técnica muy utilizada en USA generalmente asociada al reciclado in situ. Es en este país donde se han realizado los mayores estudios técnicos tratando de esclarecer los mecanismos de funcionamiento, aplicabilidad y en general las bondades de estas técnicas. Existen varias publicaciones realizadas por la NCHRP, National Cooperative Highway Research Program, (West, R et al. 2014), (Bonaquist, R. et al. 2011), donde se someten a estudio cuestiones como: la influencia del recalentamiento de

estas mezclas, el menor envejecimiento del betún en el proceso de fabricación o estudios para establecer en qué grado se mezclan el betún virgen y el del RAP en mezclas recicladas a menor temperatura.

En España estas mezclas hasta ahora han tenido poca relevancia debido principalmente a que este tipo de técnicas requieren de una inversión previa en equipamiento que sumada a la incertidumbre existente con las técnicas semicalientes ha retrasado su introducción.

2.1 Proceso de espumación

La espuma de betún puede producirse en una central de fabricación en caliente y se genera al agregar una pequeña cantidad de agua (1% a 2.5% s/b) al betún caliente (180°C); este contacto provoca un intercambio energético rápido en el cual el agua alcanza los 100°C generándose vapor, que por efecto de la presión mantenida acaba ocluido en el betún y al disminuirse la presión produce la expansión del vapor formando burbujas dentro del betún hasta alcanzar un equilibrio entre la presión y la tensión superficial del mismo. Como resultado se produce un aumento de la superficie de contacto que reduce su viscosidad formándose una espuma que inyectada en el mezclador envuelve fácilmente a los áridos permitiendo rebajar la temperatura de las mezclas en caliente.

El sistema utilizado para las experiencias descritas en este documento es el BITFOAM, sistema especialmente diseñado para plantas discontinuas. En la Figura 1 se muestra un esquema de este sistema.

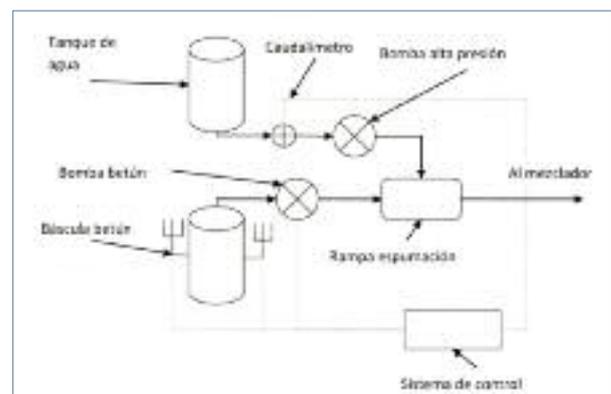


Figura 1: Esquema de funcionamiento del sistema de espumado BITFOAM.



Figura 2: Esquema de la rampa de respumación y fotografías del sistema de espumado BITFOAM en planta.

El BITFOAM está compuesto por la lanza de espumación, bomba de alta presión con variación electrónica de velocidad mediante un variador de frecuencia, un caudalímetro para el agua de espumación, el tanque de agua, y el sistema de control. También utiliza señales procedentes tanto de la bomba de inyección de betún como de la báscula de betún para ajustar, sincronizar y controlar el proceso de espumación.

El núcleo del sistema es la rampa de espumación, figura 2, en la cual se realiza la inyección de agua a través de una contracción del flujo de betún. En esta tobera se produce la violenta expansión como resultado de la evaporación del agua. El flujo bifásico resultante es conducido aguas abajo a un mezclador estático donde es homogeneizado. Esta disposición permite también introducir un aditivo líquido al betún. El sistema de control mide cómo la báscula de betún es vaciada, de forma que se asegura una coincidencia perfecta entre las inyecciones de agua y betún, siendo capaz de dosificar hasta el 4% de agua en base betún, aunque el rango normal de trabajo es de 1 al 2.5%.



Figura 3: Obras en Benimamet ejecutadas con mezclas fabricadas con betunes espumados.

2.2 Experiencias en obra y características mecánicas de las mezclas semicalientes con espuma de betún

Con el sistema mencionado se han ejecutado varias obras de mezclas semicalientes espumadas. En la figura 3 se muestran algunas fotografías; las mezclas han sido fabricadas a la temperatura de 130°C y compactadas entre 120 y 110°C en obra. Los resultados hasta el momento son satisfactorios y las mezclas extendidas se encuentran en perfectas condiciones tras más de un año de su puesta en servicio.

Características mecánicas de las mezclas semicalientes con espuma de betún

Una de las principales cuestiones que se presentan en las mezclas semicalientes espumadas, es la metodología a seguir en el control de calidad. Para su realización es necesario tener en cuenta factores que afectan a los resultados finales obtenidos. En primer lugar, estas mezclas presentan un comportamiento reológico diferente que depende bastante del método utilizado para su compactación en laboratorio y en segundo lugar surge la dificultad de mantener la temperatura de la muestra (recipiente isoterma) tomada en el extendido hasta su compactación en el laboratorio ya que recalentamientos posteriores pueden desvirtuar su correlación real con la obra. En los estudios comentados anteriormente (Bonaquist, R. et al. 2011), se establece que el recalentamiento de la mezcla no afecta significativamente a las propiedades mecánicas de las mezclas, ni tampoco afecta más de lo que lo hace en las mezclas convencionales (según sus métodos de ensayo), pero sí que influye a la hora de determinar las propiedades volumétricas.

Mezclas bituminosas recicladas semicalientes con espuma de betún

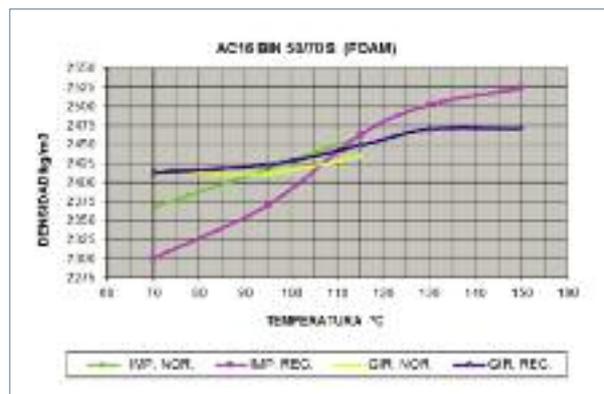


Figura 4: Representación gráfica de la evolución de las densidades de la mezcla AC16 BIN 50/70 semicaliente espumada en función de la temperatura de compactación.

En la figura 4 se muestra la evolución de los valores obtenidos para la densidad aparente según la norma UNE-EN 12697-6, en función de la temperatura para una mezcla bituminosa del tipo AC16 BIN 50/70 S Semicaliente con espuma de betún. Las series se corresponden con dos tipos de compactación diferente. La denominación "REC" delante de la temperatura, corresponde a muestras que se han tenido que recalentar en la estufa del laboratorio, desde la temperatura ambiente hasta la temperatura especificada de compactación.

Como puede apreciarse en la gráfica de la figura 4, las mezclas compactadas con giratoria presentan una evolución más tendida, presentando una densidad superior a la compactación por impacto a temperaturas más bajas. Sin embargo, alrededor de los 110°C tienden a igualarse siendo superior

la compactación por impacto a temperaturas más altas cercanas a las MBC convencionales.

La temperatura de compactación de 130 °C es la que se ha elegido en este estudio para llevar a cabo la mayoría de los trabajos y obras ejecutadas, fijando la temperatura de fabricación alrededor de los 135°C a la salida del mezclador. La selección de la temperatura ha estado basada en criterios de prudencia, siendo posible reducir la temperatura de forma más importante.

Algunas de las características mecánicas de las mezclas se muestran a continuación en las tablas 1 y 2 para una compactación por impacto y giratoria respectivamente.

En la compactación por impacto las probetas recalentadas presentan menor densidad, pero mayor estabilidad Marshall, mientras que en el caso de la compactación por giratoria las mezclas recalentadas son iguales o superiores en ambos parámetros. Atendiendo únicamente a estos ensayos mecánicos básicos, a la temperatura de 130°C, las características de las mezclas obtenidas son bastante semejantes a las correspondientes a una MBC.

Por lo general los huecos de las probetas a mayor temperatura tienden a ser bastante menores probablemente debido a la penetración del betún utilizado. Lo mismo ocurre con los resultados de los ensayos en pista que presentan una deformación bastante superior a la especificación actual para MBC; este hecho es bastante común en las mezclas semicalientes y también ha sido expuesto varias veces en la bibliografía, el cual podría estar relacionado con la menor oxidación del ligante en el proceso de fabricación.

Tabla 1: Resultados obtenidos con mezclas AC16 BIN 50/70 S semicaliente espumada compactados mediante impacto (75 golpes).

Parámetro:	Norma	Temp (°C)	70	REC70	95	REC95	115	REC115	REC130	REC150	Unid.
% de ligante	UNE-EN 12697-1	S/m	4,47	4,47	4,47	4,47	4,47	4,47	4,47	4,47	%
% de ligante	UNE-EN 12697-1	S/a	4,68	4,68	4,68	4,68	4,68	4,68	4,68	4,68	%
Densidad máxima	UNE-EN 12697-5	D _{máx}	2.585	2.585	2.585	2.585	2.585	2.585	2.585	2.585	kg/m ³
Densidad aparente	UNE-EN 12697-6	D _{aparente}	2.368	2.300	2.418	2.370	2.460	2.463	2.502	2.524	kg/m ³
Huecos mezcla	UNE-EN 12697-8	H _{mezcla}	8,4	11	6,5	8,3	4,8	4,7	3,2	2,4	%
Huecos árido	UNE-EN 12697-8	H _{árido}	18,7	21	17	18,6	15,5	15,4	14,1	13,3	%
Huecos rellenos	UNE-EN 12697-8	H _{rellenos}	55	47,5	61,8	55,3	68,8	69,3	77,2	82,2	%
Estabilidad	UNE-EN 12697:34	Est.	5,3	4,9	8,6	7,6	10,9	14,2	15,6	17,6	kN
Deformación	UNE-EN 12697:34	Def.	2,6	4,2	2,6	3,6	2,7	2,9	2,8	2,6	mm

Tabla 2: Resultados obtenidos con mezclas AC16 BIN 50/70 S Foam compactados mediante gitaroria.

Parámetro:	Norma	Temp (°C)	70	REC70	95	REC95	115	REC115	REC130	REC150	Unid.
% de ligante	UNE-EN 12697-1	S/m	4,47	4,47	4,47	4,47	4,47	4,47	4,47	4,47	%
% de ligante	UNE-EN 12697-1	S/a	4,68	4,68	4,68	4,68	4,68	4,68	4,68	4,68	%
Densidad máxima	UNE-EN 12697-5	D _{máx}	2.585	2.585	2.585	2.585	2.585	2.585	2.585	2.585	kg/m ³
Densidad aparente	UNE-EN 12697-6	D _{aparente}	2.415	2.413	2.412	2.423	2.434	2.448	2.470	2.471	kg/m ³
Huecos mezcla	UNE-EN 12697-8	H _{mezcla}	6,6	6,7	6,7	6,3	5,8	5,3	4,4	4,4	%
Huecos árido	UNE-EN 12697-8	H _{árido}	17,1	17,1	17,2	16,8	16,4	15,9	15,2	15,2	%
Huecos rellenos	UNE-EN 12697-8	H _{rellenos}	61,5	61,1	61	62,7	64,4	66,8	71,3	69,5	%
Estabilidad*	UNE-EN 12697:34	Est.	6,7	8,2	7,6	10,9	8,9	12,4	12,7	13,7	kN
Deformación*	UNE-EN 12697:34	Def.	3,5	4,4	3,6	4,8	3,7	4,5	5,0	3,9	mm
Itrs. en húmedo	UNE-EN 12697-23	ITS _{seco}	0,98	1,27	-	-	1,49	1,68	1,79	-	kPa
Itrs. en seco	UNE-EN 12697-23	ITS _{húmedo}	0,98	1,02	-	-	1,34	1,68	1,76	-	kPa
Sensibilidad al agua	UNE-EN 12697-12	ITRS	100,00	80,31	-	-	89,93	100,00	98,32	-	%

*Nota: estos valores deben ser considerados a nivel comparativo, no de forma absoluta, debido a que las probetas fabricadas con giratoria difieren en el radio de curvatura de las mordazas Marshall.

Las probetas en general presentan una buena sensibilidad al agua sin necesidad de incorporación de activantes de adhesividad, aunque los datos obtenidos para la ITRS son algo inferiores a los acostumbrados para las mezclas convencionales.

2.3 Análisis medioambiental de las mezclas semicalientes con espuma de betún

El ACV (Análisis del Ciclo de vida) es una herramienta muy potente para establecer de manera sencilla comparaciones entre productos sobre aspectos ambientales y sus impactos asociados, basándose en una metodología especificada en la norma ISO 14040 y cumpliendo una serie de etapas previas. No es objeto de esta publicación relatar todas las fases implícitas en este proceso, pero sí mostrar los resultados obtenidos para varios escenarios comparativos de las mezclas que nos ocupan.

Los resultados obtenidos se pueden apreciar en la figura 5, donde se realiza la comparativa entre una mezcla convencional tipo AC16 BIN 50/70 S fabricada a las temperaturas convencionales de las MBC (155-165°C) y su homóloga fabricada con espuma de betún a más baja temperatura (130-135°C). Por sencillez se van a mostrar únicamente las etapas

del proceso que presentan mayor incidencia comparativa: extracción de materias primas, transporte de materias primas y fabricación en planta, tomando como unidad funcional "la tonelada de mezcla bituminosa fabricada".

Para realizar el análisis existen un gran abanico de indicadores entre los que se han seleccionado principalmente dos: "Emisiones de CO₂e" y "CED (Cumulative Energy Demand)". En algunas ocasiones resulta útil recurrir también a indicadores de conjunto como "RECIPE" que establecen de manera subjetiva una prioridad ponderada sobre un mayor espectro de indicadores reales.

En las gráficas de la figura 5 se puede apreciar que las mezclas espumadas presentan un menor impacto debido a

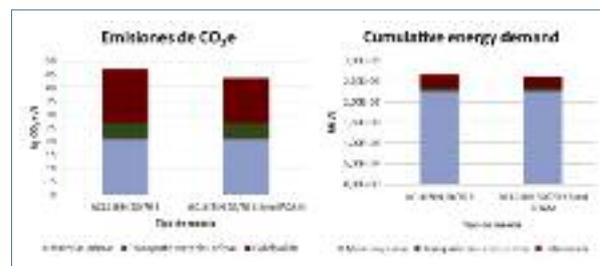


Figura 5: Comparativa mediante el indicadores CO₂e y CED de una mezcla AC16 Bin 50/70 S de fabricación estándar (160°C) y su homóloga fabricada con espuma de betún a 130°C.

Mezclas bituminosas recicladas semicalientes con espuma de betún

la reducción de la temperatura. Este hecho es más destacable en el indicador de emisiones de CO₂e y ya que en este indicador tiene mucha incidencia la fabricación, proceso donde se establece la diferencia entre ambas. En ambos indicadores la etapa de obtención de materias primas sigue siendo la más impactante. Esto se aprecia mucho más en el indicador CED, ya que en él se contabiliza toda la energía acumulada en el proceso, incluso la energía interna remanente en los materiales, haciendo que el efecto de descenso energético en la fabricación quede más diluido.

3. Mezclas Bituminosas Recicladas

La utilización de las mezclas bituminosas recicladas ha tenido un fuerte crecimiento en los últimos años en nuestro país, existiendo numerosas plantas capaces de incorporar RAP a las mezclas generalmente en baja tasa (entre 10% al 30%) aunque se han ejecutado ya bastantes obras donde se han incorporado porcentajes superiores al 50%.

En general el sistema empleado es aquel en el que se calientan los áridos vírgenes a una temperatura superior a la ordinaria dosificando posteriormente el RAP frío en el porcentaje deseado directamente al mezclador. Es en este punto donde el árido de mayor temperatura transfiere su energía al fresado y tras la pertinente homogenización se obtiene un producto final a una temperatura de trabajo normal para la mezcla de 150 a 165°C.

Este sistema tiene sus limitaciones en el porcentaje máximo de RAP incorporado ya que las temperaturas de calentamiento de los áridos vírgenes necesarias para conseguir una mezcla

final reciclada, por ejemplo, al 30%, son muy elevadas (para obtener una temperatura de mezcla de entre 150 a 165°C es necesario calentar los áridos a temperaturas superiores a 235°C).

Desde un punto de vista energético, el incremento de porcentaje de RAP en la mezcla final hace que los consumos energéticos se incrementen rápidamente rompiendo la linealidad esperada y las pérdidas energéticas derivadas de un mayor gradiente térmico son muy superiores a las de una fabricación convencional.

3.1 Análisis ambiental de las mezclas recicladas

Hasta este punto del documento solo se ha hecho referencia a factores energéticos; obviamente a medida que aumentamos el porcentaje de reciclado, intervienen muchos más factores que hacen que ambientalmente la opción con mayor contenido de reciclado resulte más sostenible.

Si se realiza el ACV del sistema hasta la etapa de fabricación obtenemos los resultados representados en la figura 6 (comparados con el indicador de CO₂e y el de conjunto RECIPE), donde se puede apreciar que a mayor cantidad de reciclado obtenemos un menor impacto ambiental, por lo que resultaría interesante aumentar el porcentaje de reciclado para obtener más ventajas ambientales.

4. Mezclas Recicladas Semicalientes con espuma de betún

Como se puede deducir del análisis anterior, es posible que para evitar en parte los inconvenientes generados por los incrementos en el consumo de energía en las mezclas recicla-

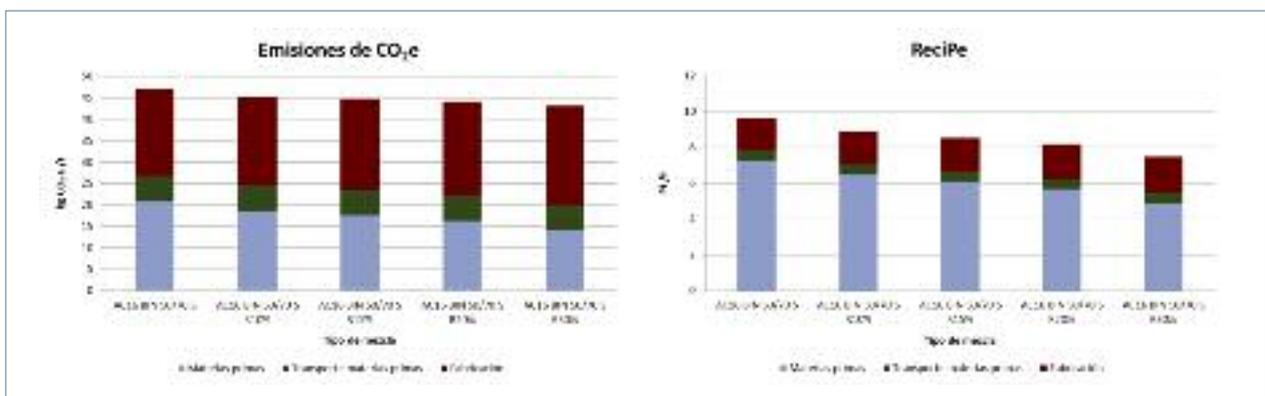


Figura 6: Análisis de ACV representado con el indicador CO₂e y el de conjunto RECIPE (unidad funcional :Tonelada Fabricada), para distintos porcentajes de RAP en la mezcla.



Figura 7: Imágenes de obra en Pedralba ejecutadas con mezclas recicladas semicalientes con espuma de betún.

das sea interesante combinar las técnicas de reciclado con el espumado de betún.

4.1 Experiencias en obra y características mecánicas de las mezclas recicladas semicalientes con espuma de betún

Utilizando esta técnica combinada de reciclado y semicaliente se han realizado, durante el año 2015 numerosas obras, de mezcla reciclada semicaliente con espuma de betún, con diferentes contenidos de RAP, generalmente entre el 10% y el 20%, extendidas a una temperatura comprendida entre los 125 a 135 °C, figura 7.

Para continuar con el mismo estudio comparativo, se muestran los resultados mecánicos correspondientes a las mezclas del tipo AC16 BIN 50/70 S fabricadas con espuma de betún al R15 % y R20%, tabla 4.

En este estudio se han obteniendo parámetros como la rigidez, el ensayo de rodadura y la resistencia a la fatiga. Los valores de los módulos de rigidez son superiores a los obtenidos en una mezcla convencional, lo que era de prever, debido a la incorporación de un ligante envejecido procedente del RAP, combinándose con valores de resistencia a fatiga adecuados.

Por ejemplo, para el caso de la R15% el valor de ϵ_6 a 30 Hz es de 144 $\mu\text{m}/\text{m}$ que resulta similar e incluso superior al obtenido para una mezcla estándar fabricada con betún 35/50.

La naturaleza del RAP y lo envejecido que se encuentre su betún, empiezan a tener importancia en este tipo de parámetros cuando se aumenta el contenido de fresado, sobre todo si alguna parte de este RAP procede del fresado de mezclas modificadas.

En el caso descrito, el RAP utilizado procede de un acopio unificado y homogenizado previamente con valores de penetración cercanos a $\text{PEN} = 10$ (0.1 mm). A pesar de la baja penetración del betún oxidado y el porcentaje empleado, los resultados sobre el ligante recuperado de la mezcla se aproximan a un betún 35/50. Esto puede ser debido al hecho de que la menor temperatura alcanzada reduce la oxidación del betún durante el proceso de mezclado si lo comparamos con las mezclas recicladas sin espumar. De hecho, la penetración y anillo & bola del betún resultante extraído de una mezcla R20% semicaliente con espuma de betún fabricada en planta, presenta los resultados que se adjuntan, que como ya se ha dicho anteriormente, están comprendidos en las especificaciones para un betún 35/50, tabla 3.

Una de las dudas que aparecen cuando se plantea la combinación de las dos técnicas, reciclado y mezclas semicalientes, es saber si a esta temperatura es posible conseguir que ambos betunes, el virgen y el RAP consigan mezclarse perfectamente. Esto ha sido comprobado en los estudios realizados por la NCHRP (Bonaquist, R. et al. 2011), donde concluyen que esta temperatura es suficiente para producirse la mezcla de ambos betunes.

4.2 Análisis ambiental de las mezclas semicalientes recicladas con espuma de betún

Siguiendo la misma metodología expuesta anteriormente, en la figura 8 se muestran los resultados comparativos correspondientes al ACV realizado a este tipo de mezclas semicalientes recicladas; las mezclas que se han comparado son:

Tabla 3. Resultados del betún extraído de una muestra AC16 BIN 50/70 S R20% semicaliente espumada.

Característica	UNE-EN	Unidad	35/50	AC16 BIN 50/70 R20% FOAM
Penetración a 25 °C	1.426	0,1 mm	35-50	43
Punto de reblandecimiento	1.427	°C	50-58	55

Mezclas bituminosas recicladas semicalientes con espuma de betún

Tabla 4: Resultados mecánicos comparativos de las mezclas tipo AC16 BIN 50/70 fabricadas a varios % RAP y con betún espumado.

Parámetro	Norma		AC16 BIN 35/50 S	AC16 BIN 50/70 S R15%	AC16 BIN 50/70 S R20%	Ud
Tipo de mezcla	Compactación por impacto					
Temperatura de compactación			150° C	130° C	130° C	
Contenido de ligante	UNE-EN 12697:1	S/m	4,3	4,14	4,37	%
Contenido de ligante	UNE-EN 12697:1	S/a	4,51	4,32	4,57	%
Densidad máxima	UNE-EN 12697:5	D _{máx}	2.549	2.408	2.561	Kg/m ³
Densidad aparente	UNE-EN 12697:6	D _{aparente}	2.430	2.529	2.417	Kg/m ³
Huecos mezcla	UNE-EN 12697:8	H _{mezcla}	4,7	4,8	5,7	%
Huecos árido	UNE-EN 12697:8	H _{árido}	15,2	14,5	15,9	%
Huecos rellenos	UNE-EN 12697:8	H _{rellenos}	69,4	66,9	64,5	%
Estabilidad	UNE-EN 12697:34	Est	14,5	14,7	13,3	kN
Deformación	UNE-EN 12697:34	Def	2,5	3,0	3,5	mm
Tracción P. en seco	UNE-EN 12697:23	ITS _{seco}	2,41	2,3	1,88	kPa
Tracción P. en húmedo	UNE-EN 12697:23	ITS _{húmedo}	2,34	2,11	1,75	kPa
Sensibilidad al agua	UNE-EN 12697:23	ITRS	97,30	91,80	93	%
Ensayo de rigidez	UNE-EN 12697:26	Módulo	6.800	7.853	7.809	Mpa
Ensayo en pista	UNE-EN 12697:22	WTS	0,07	0,09	0,06	mm
Ensayo fatiga 4 ptos 30 Hz	UNE-EN 12697:24	10 ⁶ ciclos	136	144	132	μm/m

- AC 16 BIN 50/70 S estándar (Temperatura de fabricación 155-160°C)
- AC 16 BIN 50/70 S semicaliente espumada (FOAM) (Temperatura de fabricación 130-135°C)
- AC 16 BIN 50/70 S R10% semicaliente espumada (FO-AM) (T^a fabricación 130-135°C)

- AC 16 BIN 50/70 S R20% Semicaliente espumada (FO-AM) (T^a fabricación 130-135°C)

Los resultados se muestran según los tres indicadores comentados anteriormente y en ellos se puede apreciar que existe un descenso del impacto con la utilización de mayores

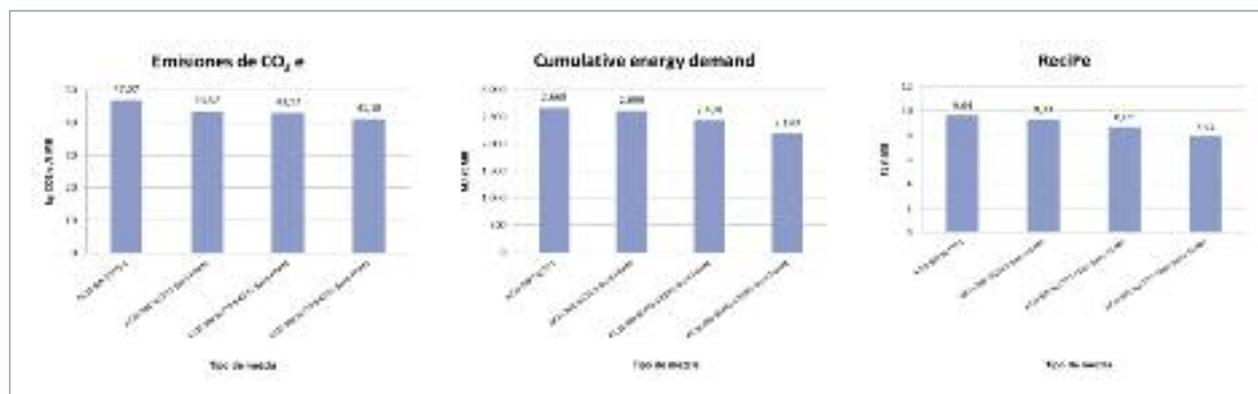


Figura 8: Análisis de ACV representado con el indicador CO₂ e, CED y el de conjunto RECIPE (unidad funcional :Tonelada Fabricada), para distintos porcentajes de RAP con espuma de betún en una mezcla del tipo AC16 BIN 50/70 S.

contenidos de RAP. Si hacemos una comparativa entre la mezcla estándar y la R20% semicaliente espumada, vemos que la reducción de emisiones de CO₂ es de un 12%; si se considera el RECIPE el diferencial agrupado es de 18%.

Igualmente si comparamos los valores de la figura 8 con los mostrados en la figura 6 entre las dos mezclas R20%, existe una reducción de un 7%, cantidad que parece mucho menor de la esperada, pero hay que tener en cuenta que en este caso se están contabilizando todos los impactos provocados en la etapas anteriores: materias primas y transporte, hecho que diluye el efecto atribuible al menor consumo energético existente en la etapa de fabricación. Si solo considerásemos la etapa de fabricación este diferencial subiría hasta el 13%.

5. Conclusiones

Después de lo expuesto se puede llegar a las siguientes conclusiones:

- Las mezclas semicalientes y semicalientes recicladas con espuma de betún son una alternativa viable, habiéndose superado en estos momentos la barrera experimental para convertirse en una realidad creciente.
- La combinación de las mezclas semicalientes con espuma de betún con la técnica de reciclado presenta características semejantes a las mezclas convencionales.
- Este tipo de mezclas reduce los impactos ambientales asociados al proceso, consiguiendo ahorros energéticos, reduciendo las emisiones CO₂ e y preservando los recursos.
- La utilización de mezclas recicladas semicalientes espumadas permite la utilización de mayores porcentajes de RAP, debido a que la temperatura de calentamiento de los áridos vírgenes puede ser inferior.
- Los sistemas de espumado y su combinación con RAP presentan una alta versatilidad, por lo que su introducción no interfiere los procesos de producción estándar.
- Todavía quedan trabajos pendientes para poder estandarizar el uso de este tipo de mezclas. Aunque existan nu-

merosas investigaciones realizadas en Estados Unidos, que sin duda deben ser tomadas en consideración, sin embargo, hay que tener en cuenta que los métodos y protocolos de ensayo no son los mismos, por lo que existe la urgente necesidad de realizar estudios que fijen definitivamente nuevos protocolos o procedimientos de ensayo y sus especificaciones técnicas asociadas, para realizar el control de calidad adecuado, correlacionado con los buenos resultados demostrados por este tipo de mezclas en la obra.

6. Referencias

- Bardesi, A., Soto, J.A. 2010. Mezclas bituminosas a baja temperatura: mezclas en frío, templadas y semicaliente. Madrid. Ingeopres nº 191. 16- 21 pág.
- Bonaquist R. 2011. Mix Design Practices for Warm Mix Asphalt, Washinton, D.C. NCHRP REPORT 691, Transportation Research Board. 32- 64 pág.
- García, L. 2014 Prestaciones y comportamiento en servicio de mezclas bituminosas semicalientes. Madrid. Asociación Técnica de la Carretera. RUTAS Nº 161 octubre –diciembre, 39-44 pág.
- Orozco, R., Pradas J.L. 2014. Mezclas recicladas semicalientes de tasa media, Madrid, Editorial Prensa Técnica, S.L. Asfalto y Pavimentación Nº 15 cuarto trimestre, pág 29-39.
- Peinado, D. 2011 BITFOAM: sistema de espumación de Betún", manual descriptivo de INTRAME. No publicado, 4 pág.
- PG3. BOE, sábado 3 de enero 2015, Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Carreteras y Caminos Vecinales. apartado 542, 881 pág.
- UNE-EN ISO 14040: 2006. Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia. Madrid. AENOR, 30 pág.
- UNE-EN-ISO 14044: 2006 Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Requisitos y directrices. Madrid. AENOR, 56 pág.
- West, R., Rodezno, C., Grant J., Prowell, B., Frank B, Osborn, L., Kriech, T. 2014. Field Performance of Warm Mix Asphalt Technologies, Washinton, D.C. NCHRP REPORT 779, Transportation Research Board 2014. 101 pág.

LET US CARE YOUR ROAD

Asphalt

Especialistas en productos Químicos y mejoras Tecnológicas para la industria asfáltica global, con dedicación exclusiva y asesoramiento personalizado.

Total compromiso con la innovación y desarrollo de alternativas ecológicas.

Fabricación y suministro de Aditivos para mezclas bituminosas y ligantes asfálticos.



Especialidades para aplicaciones asfálticas

Fibras de celulosa granulares, **Ceras** y **Tensoactivos** para la fabricación de mezclas semicalientes, **Activantes de adhesividad (a+p)**, **Pigmentos de alto rendimiento** para mezclas en caliente, **Ligante sintético** granular, **ECO-aditivo** para la fabricación de mezclas en frío ensacables, **Asfalto natural** y endurecedores de ligante, **Antiadherentes vegetales** y limpiadores alternativos al gasóleo, **Polímeros**, **Caucho NFU** y **resinas**, **Rejuvenecedores (RAP)**, aditivo **Antihielo**, **Emulgentes**, **Acidificantes**, dispersiones **SBR (Látex)**, **Solventes ecológicos**, revestimientos **Antiqueroseno**, **Pinturas** decorativas resistentes al tráfico, **sistemas para Impresión** de pavimentos, tratamientos **Protectores** de gran desempeño, **Estabilizantes** para suelos, tratamientos **Antipolvo...**



Campi y Jové

Member of



c/ Venezuela, 103 • 08019 Barcelona • Tel. +34 934 767 220 • asfaltica@cyjgroup.com • www.cyjgroup.com
ESPAÑA • ARGELIA • FRANCIA • HOLANDA • MARRUECOS • POLONIA • PORTUGAL • RUMANIA • TUNEZ

También presentes en ARGENTINA • BOLIVIA • BRASIL • COLOMBIA • CHILE • GUATEMALA • MEXICO • PARAGUAY • PERU



Consideraciones sobre el diseño de rehabilitaciones estructurales de firmes mediante técnicas de reciclado en el contexto de la norma 6.3 IC

Alberto Bardesi, alberto.bardesi@upm.es
Miguel Ángel del Val, miguel.delval@upm.es

Universidad Politécnica de Madrid

Tras unas breves consideraciones teóricas, se presenta en este artículo un ejemplo práctico que muestra cómo, a pesar de las supuestas limitaciones derivadas de la normativa vigente en España, es posible diseñar una rehabilitación del firme de una carretera con una alta intensidad de tráfico pesado recurriendo a las técnicas de reciclado. A este respecto, hay que tener presente que muchos proyectistas no abordan las posibles soluciones basadas en el reciclado amparándose en lo que ellos interpretan que es una prohibición de la normativa. Es muy posible, ciertamente, que esta necesite ser actualizada, pero, aun así, no debe emplearse como excusa de un proyecto insuficiente. Otra cuestión es la disponibilidad de instalaciones y de máquinas para que el resultado de lo que se ejecute se corresponda con las previsiones del proyecto.

Palabras clave: firme, rehabilitación, reutilización, reciclado, mezcla asfáltica, material de fresado

After some brief theoretical considerations, this article presents a practical example of how, despite the supposed limitations derived from the current regulations in Spain, it is possible to design a rehabilitation of a road pavement with a high volume of heavy traffic using recycling technologies. In this regard, we have to take into account that many engineers do not address the possible solutions based on recycling on the grounds of what they believe is a prohibition of the official guidelines. It is certainly very possible that the guidelines need to be updated; however, it should not be used as an excuse of an insufficient design. Another issue is the availability of asphalt plants and compactors in order for the result of what is built to correspond with the design projection.

Keywords: pavement, rehabilitation, reuse, recycling, asphalt concrete, reclaimed asphalt pavement (RAP)

1. Introducción

Este artículo contiene una reflexión y un ejemplo sobre cómo diseñar firmes con materiales reciclados, aportando algunas sugerencias sobre la aplicabilidad y la caracterización de dichos materiales. Al plantear en un proyecto de rehabilitación estructural, la posibilidad de recurrir a técnicas de reciclado, lo primero de lo que hay que ser conscientes es de que este tipo de proyectos son, sin duda, los más complicados entre los de diseño de firmes. La identificación correcta de tramos homogéneos, la interpretación de los datos de auscul-

tación y la caracterización o valoración de los materiales resultantes de los procesos de reciclado ponen las cosas especialmente difíciles.

Aunque siempre hay quien prefiere abordar el problema sin más ayuda que sus conocimientos del comportamiento de los firmes y de los materiales que los componen, una primera recomendación para el proyectista es que tenga a mano normas, manuales u otros documentos fiables que le permitan ir contrastando las decisiones que va tomando. En el caso español, por ejemplo, las normas 6.1 IC (Secciones de firme) y 6.3 IC (Rehabilitaciones de firme) constituyen un excelente

Consideraciones sobre el diseño de rehabilitaciones estructurales de firmes mediante técnicas de reciclado en el contexto de la norma 6.3 IC

punto de partida; el método AASTHO, especialmente en otros entornos geográficos, también es una herramienta muy importante. Manejar programas de dimensionamiento analítico es así mismo muy recomendable, pero no como sustitutos de los anteriores, sino como complemento. Y, por supuesto, el sentido común y la experiencia: si algo no “suena” bien, si algo “choca” en una solución, desconfíese, seguramente estará mal. Bien es cierto que aquí surge un grave problema: si uno no tiene sentido común, seguramente no lo sabe; si uno no tiene experiencia..., algún día hay que empezar. Y para empezar, no se olvide que el que hace una pregunta quizás parezca ignorante algunos minutos, pero quien no la hace, será siempre ignorante.

En cualquier caso, debe partirse del convencimiento de que las técnicas de reciclado abren una gama de posibles soluciones con las que, frente a las convencionales, se puede lograr una reducción del impacto ambiental, un aumento de durabilidad y un menor coste de la actuación, que es de lo que esencialmente se trata.

2. Aplicabilidad y caracterización de materiales reciclados

Si se pretende usar una técnica de reciclado, lo primero es asegurarse de que el material tiene las condiciones oportunas, esto es, que ha llegado, o está muy próximo a llegar, al final de su vida útil y, por otro lado, que sometido al proceso de reciclado el material obtenido tendrá unas condiciones mecánicas, a corto y a largo plazo, adecuadas para el futuro firme. Existe una excepción, sin embargo, puesto que en ocasiones puede interesar tratar un material, por ejemplo una capa granular, para aumentar notablemente su capacidad estructural, transformándolo en un suelocemento o en una gravaemulsión (aunque es discutible quizás si esto es propiamente un reciclado).

Si no se dispone del conocimiento, de la experiencia o de los equipos necesarios para abordar una solución con una determinada técnica de reciclado, es siempre mejor optar por otra técnica, evitando así dejar al director de obra en una difícil situación. Esto no quiere decir que no se deban proyectar soluciones tecnológicamente novedosas, sino más bien al contrario: se debe fomentar la innovación, pero entonces hay que dar al proyecto un enfoque diferente del habitual, especialmente en lo que se

refiere al sistema de licitación y a los requerimientos exigidos a los eventuales licitadores.

Por último, el proyectista debe ser conocedor de las posibilidades que ofrecen las distintas técnicas de reciclado. Difícilmente se estará ante un proyecto en el que pueda plantearse una amplia variedad de soluciones. Lo más normal es que, junto a las soluciones clásicas de rehabilitación, haya una, máximo dos, opciones viables con materiales reciclados, especialmente si se quiere que los materiales a reciclar procedan de la propia obra. En este sentido, se deben tener en cuenta las aplicabilidades reales de cada una de las distintas técnicas de reciclado.

2.1 Reciclados *in situ* con cemento

Existen dos campos preferentes de actuación. En primer lugar están las “reconstrucciones” de firmes totalmente agotados, prácticamente arruinados. Es una situación a la que se llega por un mal proyecto, una deficiente ejecución y una inadecuada o inexistente conservación. La opción de reciclar los materiales existentes en una profundidad entre 20 y 30 cm (incluso más si se disponen medios de ejecución adecuados) permite un diseño que debe tomar como referencia una solución de firme nuevo (de la Norma 6.1 IC, por ejemplo), estableciendo algún tipo de equivalencia entre el material reciclado con uno convencional (la relación 1:1 con el suelocemento es la preconizada en el anejo 2 de la Norma 6.3 IC). De optarse por un dimensionamiento analítico habría que caracterizar en laboratorio sobre un material lo más parecido al que resultaría del proceso (aspecto clave, como en cualquier otra técnica de reciclado). Si se obvia esta determinación, hay que ser prudentes y emplear módulos y una ley de fatiga similares a las de un suelocemento (por ejemplo: $E = 8.000 \text{ MPa}$; $\sigma = 0,25$; $r/RF = 1 - 0,08 * \log N$)

Por otro lado, hay que hacer referencia a la adaptación de firmes de vías de baja intensidad de tráfico (caminos rurales, vías agrícolas, vías forestales, carreteras de uso general con muy bajas intensidades de tráfico pesado) a un tráfico superior. Sobre este campo de actuación existe una experiencia excelente en algunas administraciones españolas. En una línea similar, aunque se trata de algo distinto, hay que llamar la atención sobre la aplicación de esta técnica en operaciones de ensanchamiento de la plataforma. En estos casos se deben adoptar algunas precauciones muy importantes:

- Tomar en consideración la enorme diferencia entre los módulos de los materiales granulares no tratados y los módulos de los tratados con cemento.
- Hay que recordar que los materiales tratados con cementos suelen ser más impermeables que los granulares (atención a la acumulación de agua en el firme antiguo en caso de eventuales infiltraciones a través de superficies fisuradas).
- Sobre los soportes nuevos de las bandas de ensanche difícilmente se podrán dejar con un buen acabado los materiales tratados con cemento, por lo que habrá que recurrir a operaciones posteriores de reperfilado.

Cualquiera que sea el caso, los factores clave del éxito, supuesto que se cuenta con un equipo de reciclado de potencia suficiente para las operaciones de fresado y de mezcla en el espesor establecido, son el sistema de incorporación del cemento (de preferencia en forma de lechada, para poder garantizar la homogeneidad de la dotación de conglomerante), el equipo de compactación (que debe garantizar en todo el espesor las densidades exigidas) y el rigor en los tiempos de curado y en el momento de llevar a cabo la prefisuración (siempre aconsejable).

2.2 Reciclado en frío *in situ* con emulsión o con espuma de betún

El campo de aplicación menos habitual es el de la transformación de firmes de vías de baja intensidad de tráfico con subbases y bases de materiales granulares (normalmente zahorras, aunque puede encontrarse también macadam al agua) en otros con base bituminosa constituida a partir del reciclado en frío (lo que se complementa con una o varias capas de mezcla asfáltica, aunque a veces se pueda recurrir también a una capa de rodadura formada por un riego con gravilla o una lechadas bituminosa).

En segundo lugar está el reciclado *in situ* de mezclas bituminosas agotadas como técnica alternativa a la rehabilitación más tradicional basada en el fresado de esas mezclas y su reposición. Para valorar esta alternativa y poder diseñar la rehabilitación se puede recurrir también al Anejo 2 de la Norma 6.3 IC, el cual establece una equivalencia de 0,75 entre el reciclado en frío (entendido en el sentido del artículo 20 del PG-4) y la mezcla asfáltica en caliente convencional. Por

supuesto, cabe también realizar un dimensionamiento analítico, para lo que se necesitará caracterizar el material en laboratorio.

Más complicado es proponer valores de módulos y leyes de fatiga genéricas para estos materiales. Los valores del módulo de rigidez evolucionan con el grado de maduración, desde valores próximos a los de un material granular tras la compactación, hasta valores comparables a los de una mezcla tipo AC base G al cabo de 12-18 meses. Adoptar unos módulos de $E = 3.000 \text{ MPa}$ y $\nu = 0,35$ podría ser aceptable en primera instancia y a falta de mejores datos. Más difícil aún es elegir una ley de fatiga, por la falta de estudios sistemáticos sobre esta técnica.

Aspectos clave en estos procesos, aparte de contar con el equipo de reciclado adecuado, son la continuidad de las operaciones (para poder garantizar una granulometría razonablemente uniforme del material fresado o RAP) y un potente equipo de compactación (que pueda asegurar altas densidades con un mínimo de agua de aportación).

2.3 Reciclado templado en planta con emulsión o con espuma de betún

Es la versión más "moderna" de los reciclados con materiales bituminosos y se sitúa a medio camino entre los reciclados *in situ* con emulsión y los reciclados en caliente en planta. Con los primeros comparte el tipo de ligante y la proporción de RAP (100 %) y con los segundos las instalaciones de fabricación y de puesta en obra, así como los campos de aplicación. La combinación de temperatura media ($< 100 \text{ }^\circ\text{C}$) con la humedad proporcionada por la emulsión permiten una compactación más eficiente que en frío, lo que redundará en una calidad mayor del producto final. Esta técnica, aún incipiente pero ya con indudables éxitos, se configura como una de las alternativas más interesantes de empleo del RAP y a buen seguro ocupará próximamente un lugar entre los sistemas recogidos en España en el PG-4. La clave del éxito consiste en realizar una adecuada clasificación del RAP (en dos o tres tamaños diferentes) y en disponer de una planta con una configuración que permita el calentamiento del RAP sin riesgo de quemar el betún.

Por su forma de fabricación, al reciclado templado en planta debería, a efectos de valoración estructural, asignársele un mejor coeficiente de equivalencia en términos de

Consideraciones sobre el diseño de rehabilitaciones estructurales de firmes mediante técnicas de reciclado en el contexto de la norma 6.3 IC

mezcla en caliente nueva que el reciclado en frío: coeficientes de 0,8 o de 0,85 podrían considerarse adecuados en principio. No se dispone aún de información acumulada suficiente para establecer criterios de caracterización a efectos de dimensionamiento analítico, por lo que en cada caso debería recurrirse a realizar los ensayos pertinentes. De todas formas es de esperar que los valores se sitúen bastante próximos a los de las mezclas en caliente, al menos a las del tipo AC base G.

2.4 Reciclado en caliente en planta

Al igual que los reciclados templados, los reciclados en caliente en planta tienen también dos campos de aplicación preferentes. Por un lado, en operaciones de rehabilitación importantes son una alternativa, dentro de la propia obra, a la solución de reposición de zonas fresadas con mezcla nueva. La cuestión principal es definir la proporción de RAP en la mezcla reciclada, teniendo en cuenta los espesores y las anchuras fresados frente a los de las capas en las que se podría emplear dicha mezcla reciclada; obviamente, hay que disponer de la planta adecuada para poder trabajar con la proporción de RAP que se determine.

El segundo campo es el del empleo de mezclas recicladas en cualquier tipo de obra: nueva construcción, recrecimiento o reposición tras fresado. Sin duda es el campo de aplicación prioritario en las grandes zonas metropolitanas donde se producen frecuentes, pero relativamente pequeñas, operaciones de fresado y reposición. Es imprescindible disponer de un eficiente sistema de almacenamiento, clasificación y homogenización del RAP que permita obtener el máximo rendimiento a numerosas entradas de RAP de orígenes diversos. Igualmente, la planta deberá disponer de un sistema de calentamiento del RAP adecuado a los porcentajes de RAP que se quieran utilizar.

Respecto a la caracterización del material de cara al dimensionamiento, aparte de que siempre sea recomendable realizar los correspondientes ensayos de determinación de módulos y de la ley de fatiga, se puede recurrir como primera aproximación a la equiparación con mezclas convencionales. Desde el punto de vista del módulo quizá sea razonable pensar en mezclas del tipo AC base S, es decir, en valores de los módulos del orden de $E=6.000-7.000$ MPa y $=0,33$. Sin embargo, en lo que a la ley de fatiga se refiere

parece más prudente decantarse por las de las mezclas del tipo AC base G. En las normas 6.1 IC y 6.3 IC se adopta una ley de fatiga idéntica ($r=6,925 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0,27243}$) para todas las mezclas del tipo AC, excepto para las de alto módulo (MAM), pero para mezclas recicladas se habla de una ley específica (se entiende que a determinar en cada caso en base a ensayos). Siguiendo con el criterio de prudencia podría emplearse un coeficiente de 6,617 (correspondiente a mezclas MAM) o de 6,443 (propugnado en el método ICA-FIR de la Junta de Andalucía para las mezclas del tipo AC base G) en lugar del 6,925, manteniendo sin embargo el exponente de N.

Si prefiere la simplificación que supone el uso de coeficientes de equivalencia en términos de mezcla nueva, se dispone de una referencia en el Anejo 2 de la Norma 6.3 IC, que cifra esta equivalencia entre 0,8 y 1. Resulta evidente que el valor de 1 es perfectamente aplicable a mezclas recicladas con bajo contenido en RAP (de hecho cuando el porcentaje de RAP es inferior al 10 % la mezcla se debe considerar como nueva a todos los efectos). A falta de mayor concreción en futuras versiones de la propia Norma 6.3 IC o en las especificaciones sobre materiales reciclados en el PG-4, habría que relacionar ese coeficiente con el contenido concreto de RAP (a más RAP, más se aleja la mezcla reciclada de una mezcla nueva. El límite inferior estaría en el 0,8 que parece propuesto para los mayores porcentajes de RAP (≥ 50 %)). También tendría su lógica establecer alguna modulación al coeficiente de equivalencia en función de las características de la planta asfáltica y de su capacidad para manejar mayores o menores contenidos de RAP, pero no parece fácil poder considerar esto en la fase de proyecto.

3. Un ejemplo de aplicación

Supóngase que se está planteando la rehabilitación del firme de una de las dos calzadas de un tramo de 12 km de una autovía de dos carriles por sentido. La autovía se encuentra en una zona con temperaturas muy suaves en verano y de baja pluviometría (menos de 600 mm anuales). La obra se construyó en el año 1999. La sección del firme (ver figura 1), apoyada en una explanada de categoría E2, está formada por 20 cm de suelocemento (SC), 20 cm de gravacemento (GC), una capa intermedia de 9 cm de mezcla asfáltica (granulome-

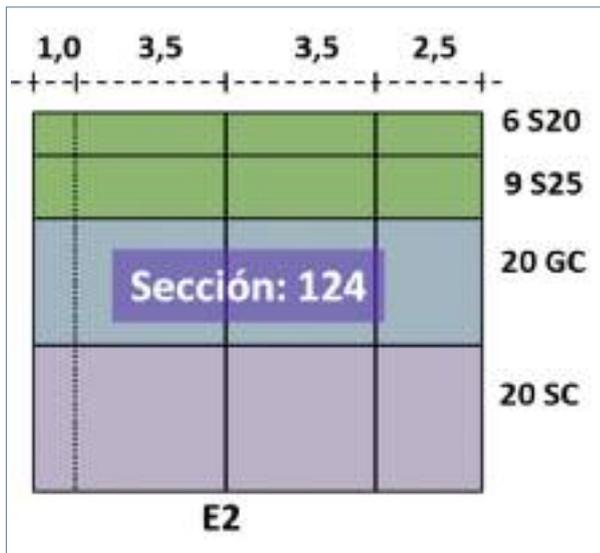


Fig. 1. Esquema de la sección de firme existente.

tría S25, áridos calizos y un 4,2 % s/áridos de betún que originalmente era 60/70) y una capa rodadura de 6 cm de mezcla asfáltica (granulometría S20, áridos silíceos y un 4,75% s/áridos de betún que originalmente también era 60/70).

En la primavera de 2014 se ha procedido a una auscultación general del tramo con vistas a evaluar su capacidad estructural y a redactar un proyecto de rehabilitación. La entrada en servicio de la obra estaría prevista para el otoño de 2015. Los datos disponibles son:

- La IMD del tramo, calculada a través de los datos de aforo disponibles, es en 2013 de 19.850 vehículos, con una proporción de vehículos pesados del 12,25 %. El crecimiento anual acumulativo de los 5 últimos años del tráfico pesado ha sido del 1,2 % pero, por seguridad, se adoptará un 4 %.

- La inspección visual del tramo mostró, de forma resumida, un agrietamiento transversal característico cada 4-6 m en todo el tramo y una grieta longitudinal aproximadamente coincidente con la línea de separación de carriles. En el carril derecho, el agrietamiento transversal inicial se ha ido ramificando en algunas zonas con pérdida de material que ha tenido que ser bacheado en distintas actuaciones de conservación rutinaria. Adicionalmente, se observa un problema generalizado de envejecimiento de la capa de rodadura con algo de fisuración.
- Los valores medios de CRT obtenidos con SCRIM son de 0,38 en el carril derecho y de 0,43 en el izquierdo.
- La auscultación estructural, realizada con deflectómetro de impacto cada 200 m, permite distinguir dos zonas (A y B) claramente diferenciadas. Los valores de deflexiones, ya corregidos, son los de la Tabla 1 (en primera instancia no se han considerado los cuencos de deflexión).

Se desea considerar una solución de recrimiento conforme a la Norma 6.3 IC y alternativamente una solución basada en técnicas de reciclado, pero que cumpla también los criterios de la Norma 6.3 IC. Se compararán económicamente entre sí.

Los ocho pasos que deberían darse son los que se exponen seguidamente.

1. Determinación de la categoría de tráfico pesado (en 2015) y tipo de sección estructural

Tráfico: $19.850 \times 0,5 \times 0,1225 \times 1,042 = 1.315$ veh. Pesados por día y carril T1

Tipo de sección: SC+GC+MB Semirrígida

Tabla 1. Resumen de la medida de deflexiones.

Zona	Carril	Longitud	Deflexión patrón	Deflexión de cálculo
A	Derecho	8000m	75-90	125-150
	Izquierdo	8000 m	25-35	50-80
B	Derecho	4000 m	40-65	80-125
	Izquierdo	4000 m	15-25	< 40

Consideraciones sobre el diseño de rehabilitaciones estructurales de firmes mediante técnicas de reciclado en el contexto de la norma 6.3 IC

Tabla 2. Espesores de recrecimiento.

Zona	Carril	Deflexión de cálculo	Recrecimiento mínimo (cm)	Recrecimiento necesario (cm)
A	Derecho	125-150	18	18
	Izquierdo	50-80	12	18
B	Derecho	80-125	15	15
	Izquierdo	< 40	Act. preventiva	15

2. Determinación de zonas localizadas en las que aparece agotamiento estructural que afecta a la explanada

En estas zonas habría que realizar reparaciones de saneo (incluyendo la explanada). Para determinar si son necesarias se parte del valor de la deflexión patrón, que se compara con los valores de la Tabla 2 de la Norma 6.3 IC. Dado que no existe ningún punto que presente una deflexión patrón superior a 100 se pasa sin más a la siguiente fase.

3. Determinación de zonas localizadas en las que hay un agotamiento estructural del firme

Se trata de zonas en las que sería necesario realizar actuaciones de saneo sobre el firme si no se llevase a cabo un recrecimiento en el tramo en el que están. Para ello se compara el valor de la deflexión patrón con los de la Tabla 3 de la Norma 6.3 IC: las zonas que presentan una deflexión patrón superior a 40 (el valor de referencia para el tipo de sección estructural y la categoría de tráfico pesado) pertenecen todas ellas al carril derecho. Caben las opciones de recrecimiento, de fresado y reposición, y de fresado, reposición y recrecimiento.

4. Espesores mínimos de mezcla asfáltica nueva equivalente tras la rehabilitación

De acuerdo con la Tabla 4 de la Norma 6.3 IC, si tras el proceso de rehabilitación se mantiene la gravacemiento el espesor mínimo final de mezclas asfálticas equivalentes a nuevas debería ser de 18 cm. Este criterio debe aplicarse siempre que se frese o se recicle el firme existente.

5. Cálculo de espesores de recrecimiento

Con la categoría de tráfico pesado y la deflexión de cálculo se entra en la Tabla 5B de la Norma 6.3 IC para obtener el espesor mínimo de recrecimiento. Para mantener la rasante

habría que recrecer en toda la anchura de la sección con el espesor máximo de ambos carriles, por lo que la solución quedaría como se indica en la Tabla 2. Esto supondría colocar espesores de recrecimiento muy superiores a los necesarios tanto en el carril izquierdo como en los arcenes.

6. Análisis de la solución con fresado del carril derecho y recrecimiento

La utilización de esta solución permite optimizar el espesor de mezcla en cada carril, evitando tener que extender el espesor de recrecimiento del carril con mayor deterioro a todo lo ancho. Se parte de que se va a disponer una rodadura BBTM 11B en toda la anchura, lo que vendría obligado porque es el único tipo de mezcla que la Norma 6.1 IC acepta para la categoría de tráfico pesado T1 y una zona pluviométrica seca.

Zona A

Como el mínimo recrecimiento de ambos carriles es 12 cm, se dispondrá sobre ellos una capa intermedia de 9 cm de mezcla del tipo AC22 bin S y después los 3 cm de BBTM 11B en la capa de rodadura. Lógicamente, la capa intermedia se colocaría también tanto en el arcén interior como en el exterior. Siempre que se frese y se repone hay que comprobar si se cumplen los espesores mínimos de mezcla equivalente a nueva, teniendo en cuenta la aportación de la mezcla efectivamente nueva y la de la mezcla antigua que no se va a fresar afectada de un coeficiente de minoración que tenga en cuenta su grado de deterioro. En el carril derecho faltarían 6 cm de mezcla nueva para llegar a los 18 cm de espesor de recrecimiento que, además, coinciden con los del criterio de espesor mínimo de mezcla nueva equivalente. La solución sería fresar 6 cm y reponer con mezcla del tipo AC22

base S en los 3,5 m del carril derecho. Aun siendo más caras que las G, las mezclas S tienen un mejor comportamiento frente a la reflexión de fisuras, por lo que en este caso, sobre una capa de gravacemento, sería la mejor opción.

Zona B

Como en el carril izquierdo y en el arcén no hace falta recrecer, en el carril derecho faltarían 12 cm de mezcla nueva para llegar al espesor de recrecimiento. La solución sería fresar y reponer con mezcla AC32 S en los 3,5 m de dicho carril derecho. Pero dado que se fresa, el criterio de diseño debe ser el del espesor mínimo de mezcla sobre la gravacemento; como este espesor mínimo es de 18 cm, se necesita fresar y reponer los 15 cm actuales. La solución, en definitiva, sería fresar los 15 cm y reponer con 6 cm de AC22 bin S y 9 cm de AC32 base S en el carril derecho, además de poner los 3 cm de BBTM como capa de rodadura nueva en toda la anchura, solucionando así los problemas de envejecimiento de la capa rodadura antigua en los arcones y en el carril izquierdo. Como medida adicional, en la zona no fresada se debería pensar en realizar un sellado de fisuras previo a la colocación de la capa nueva de BBTM.

7. Análisis de la solución con materiales reciclados de la misma obra

7.1 Reciclado con cemento

Esta solución no tiene sentido en este caso, pues si se reciclan las capas de mezcla con cemento se obtendría un ma-

terial similar al suelocemento ubicado sobre dos capas de naturaleza análoga. Además habría que seguir disponiendo un mínimo de 18 cm de mezclas asfálticas. Por tanto, esta solución queda descartada.

7.2 Reciclado en frío con emulsión

Zona A

Teniendo en cuenta una equivalencia entre el reciclado y una mezcla nueva de 0,75, para obtener un espesor equivalente a 6 cm de mezcla del tipo AC22 S, será necesario reciclar en un espesor de 8 cm; esto es factible, pues hay un total de 15 cm de mezcla. Se debería abordar un análisis económico en el que se tuviese en cuenta el ahorro de áridos y de betún, así como el ahorro por no tener que llevar a vertedero o planta de reciclado parte del material de fresado. Esta solución podría ser viable en este tramo.

Zona B

Hay varias limitaciones que deben ser tenidas en cuenta. Por un lado, la citada equivalencia de 0,75 (Tabla 11 de la Norma 6.3 IC) entre la mezcla reciclada en frío y la mezcla nueva convencional; en segundo lugar, que el espesor máximo de reciclado en frío es de 12 cm; en tercer lugar, que con una categoría de tráfico pesado T1 un reciclado en frío debe quedar cubierto por un mínimo de 8 cm de recrecimiento; finalmente, que hay que alcanzar los 18 cm mínimo de mezcla equivalente sobre la gravacemento. Por ello, habría que disponer una capa intermedia de mezcla, cuyo espesor mínimo sería de 5 cm, bajo la rodadura es de 3 cm; así se alcanzarían los 8 cm mínimos de recrecimiento y se necesitarían otros 10 cm de mezcla equivalente a nueva que se obtendrían mediante el fresado en frío de los 12 cm superiores, que equivaldrían a 9 cm de mezcla nueva (los 3 cm inferiores aportarían el centímetro restante: un factor de equivalencia de 0,33 parece prudente).

No parece, en principio, que el ahorro de áridos y de betún, así como de no tener que llevar a vertedero material de fresado, vaya a ser mayor que el coste de tener que emplear una unidad nueva (equipos diferentes) y, sobre todo, de la nueva capa intermedia que habrá que colocar. Por tanto, esta solución en el tramo B no parece a priori

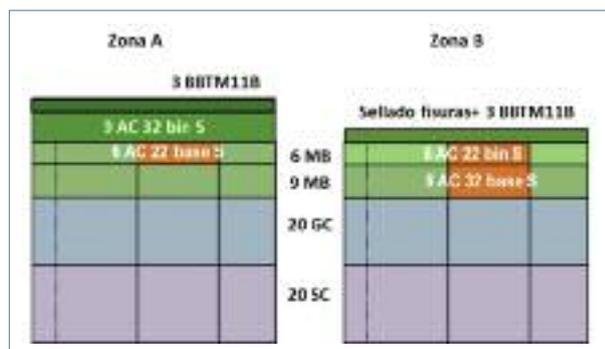


Fig. 2. Esquemas de las soluciones con fresado del carril derecho y recrecimiento.

Consideraciones sobre el diseño de rehabilitaciones estructurales de firmes mediante técnicas de reciclado en el contexto de la norma 6.3 IC

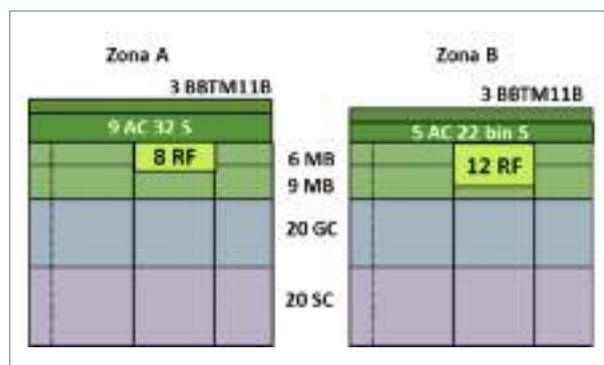


Fig. 3. Esquemas del posible reciclado en frío con emulsión.

viable económicamente, aunque tiene la ventaja de emplear el 100 % del RAP.

7.3 Reciclado en caliente en planta

La Norma 6.3 IC limita el uso del reciclado en caliente de la siguiente forma cuando la categoría de tráfico pesado es la T1:

- En los carriles: se requiere un espesor mínimo de recrecimiento de 6 cm
- En los arcones: se requiere que haya una capa de rodadura sobre el material reciclado.

De acuerdo con esto, en el ejemplo planteado la mezcla reciclada en caliente se podría utilizar en:

- Zona A: reposición del fresado (6 cm) y arcones (9 cm)
- Zona B: reposición de los 9 cm inferiores del fresado.

Por otro lado está la cuestión de la equivalencia estructural. La Tabla 11 de la Norma 6.3 IC establece un rango de 0,8 a 1 como equivalencia entre una mezcla reciclada y una nueva, pero no se detallan criterios de asignación dentro de ese rango. A su vez, el PG-3 admite el uso de hasta un 10 % de RAP en una mezcla para que sea considerada como nueva y en el artículo 22 del PG-4 se limita el uso de RAP en mezclas recicladas al 50 %.

De entrada, y como criterio de prudencia, se podría establecer el empleo de un 10 % de RAP en las mezclas para capa intermedia y un coeficiente de equivalencia de 1,0 en las mezclas recicladas en las que no se superase el 25 % de RAP. Debe tenerse en cuenta que en este momento en Espa-

ña apenas hay todavía plantas asfálticas que permitan trabajar con garantías con proporciones superiores de RAP.

De esta forma se sustituirían la mezcla de reposición de 6 cm del carril derecho de la zona A y los 9 cm inferiores (antigua capa intermedia) de los 15 fresados en el carril derecho de la zona B por mezcla reciclada con un 25 % de RAP. Además, en el recrecimiento del arcén exterior de la zona A se emplearía también mezcla reciclada con el 25 % de RAP; en el resto de la capa intermedia de recrecimiento de la zona A (arcén interior y los dos carriles) se emplearía mezcla con un 10 % de RAP. En definitiva, se aprovecharía en la propia obra un 46,5 %, aproximadamente, del RAP obtenido en el fresado. Obviamente, subiendo el porcentaje de RAP en las mezclas recicladas (hasta el límite del 50 % permitido en este momento por la Norma 6.3 IC), podría aumentar el aprovechamiento del fresado, pero también habría que cuestionarse el coeficiente de equivalencia adoptado, lo que obligaría a replantear el conjunto de la solución. El esquema de la solución adoptada sería el indicado en la Figura 4.

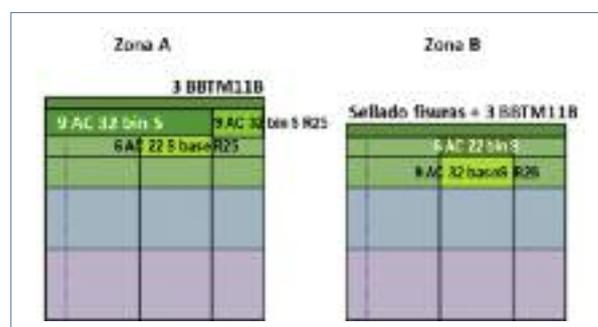


Fig. 4. Esquemas de las posibles soluciones utilizando mezcla reciclada en planta.

7.4 Opciones fuera del ámbito de la Norma 6.3 IC

Cabe pensar, por supuesto, en la posibilidad de aprovechar en la mayor medida posible el RAP generado dentro de la obra obviando algunas de las limitaciones que establecen la Norma 6.3 IC o el artículo 22 del PG-4. Por ejemplo, podría plantearse ir más allá del límite del 50 % de RAP. Como se ha indicado, esto sólo es factible con algunas plantas asfálticas, las de doble tambor concéntrico, por ejemplo, y requiere además unos sistemas de clasificación y dosificación del RAP muy precisos y rigurosos. Así mismo, como también se ha apuntado más arriba, habría entonces que reconsiderar el co-

eficiente de equivalencia (adoptando, por ejemplo, un valor de 0,80-0,85).

Otra posibilidad sería emplear mezcla reciclada en la capa intermedia de la zona A. Con esta medida se aumentaría el porcentaje de RAP aprovechado hasta, aproximadamente, el 80 %. Si, simultáneamente, se elevase la tasa de RAP en la mezcla reciclada al 31 % se estaría aprovechando el 100 % del fresado producido. Habría que replantearse también el coeficiente de equivalencia (por ejemplo a 0,9) y, en consecuencia, una medida de prudencia sería aumentar el espesor de la intermedia de 9 a 10 cm.

Finalmente, hay una opción se corresponde con la experiencia adquirida en muchos proyectos de rehabilitación. Téngase en cuenta que, por buenos que sean los resultados de medida de las deflexiones en el carril izquierdo de la zona B, tras 15 años de servicio un pequeño recrecimiento con 5 cm de capa intermedia en toda la anchura de la sección no parece descabellado. Si además se fuese a una tasa del 26 % de RAP en la mezcla reciclada, se estaría aprovechando la totalidad del material obtenido del fresado y dotando al firme en las zonas de una solución de refuerzo potente, durable y habiendo empleado todo el RAP en la misma carretera.

Referencias

- AASHTO (1993): AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, AASHTO, Washington, D.C.
- DIRECCIÓN GENERAL DE CARRETERAS (2001): Reciclado de firmes (Artículos 20, 21 y 22 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Conservación de Carreteras PG-4), 36 pág., Centro de Publicaciones del Ministerio de Fomento, Madrid
- DIRECCIÓN GENERAL DE CARRETERAS (2003): Secciones de firme, Norma 6.1 IC de la Instrucción de carreteras, 41 pág., Centro de Publicaciones del Ministerio de Fomento, Madrid
- DIRECCIÓN GENERAL DE CARRETERAS (2003): Rehabilitación de firmes, Norma 6.3 IC de la Instrucción de carreteras, 74 pág., Centro de Publicaciones del Ministerio de Fomento, Madrid
- DIRECCIÓN GENERAL DE CARRETERAS (2004): Firmes y pavimentos (Parte 5ª del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes PG-3), 116 pág., Centro de Publicaciones del Ministerio de Fomento, Madrid

#22

AFIRMACIONES ASFÁLTICAS

“Innovaciones como las de las mezclas semicalientes reducen el consumo de energía y emisiones” (Mezcla reciclada semicaliente de tasa media; número 15)

#SOSTENIBILIDAD_Y_MEDIO_AMBIENTE

FABRICANTE Y DISTRIBUIDOR DE EQUIPOS PARA INGENIERIA CIVIL

ANALIZADOR AUTOMÁTICO DE ASFALTO

El analizador asfáltico Infratest funciona como un sistema estanco (consumo de disolvente <20 ml por extracción) al contrario de los sistemas no estancos (consumo es > 500 ml por extracción.)!!!

BENEFICIOS

- Sistema estanco único
- Consumo y emisión de disolvente minimizado aprox. 1/10
- Extracción rápida – aprox. 35 min y comprende el secado
- Resultados reproducibles y asegurados
- Ambiente totalmente limpio

Programado para 3 disolventes:

- Tricloroetileno (Tri)
- Diclorometano
- Tetracloroetileno (Per)

Para la extracción

- Mezclas normales de carreteras
- Mezclas modificadas con goma
- Utilización con disolventes no inflamables



PAV - HORNO DE TRATAMIENTO DE ENVEJECIMIENTO
NORMAS EN 14789 • ASTM D652 • AASTHO R28



EQUIPO PARA ENVEJECIMIENTO DE PROBETAS ASFÁLTICAS (SATS)
NORMA 12697-45



RTFOT HORNO DE ENSAYO DE PELÍCULA DELGADA (ROLLING THIN FILM OVEN TEST)
Normas En 12607-1
ASTM D2872 • AASTHO T240



Mecánica Científica S.A. Fabricante de equipos para ensayos de:

- ARIDOS • SUELOS • CEMENTOS • AUSCULTACION DE FIRMES / VIAS • ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS
- ROCAS • HORMIGONES • LIGANTES • MEZCLAS BITUMINOSAS

¡LIDER EN CALIDAD!



Buenas prácticas para la puesta en obra de mezclas bituminosas:

7. Compactación de las mezclas bituminosas

Andrés Costa

Excoordinador Grupo 1 de ASEFMA

1. Definición de la actuación

Esta es la última fase de la construcción de una capa del firme con mezcla bituminosa. Como todas las anteriores fases, es muy importante y debe realizarse de acuerdo con las especificaciones técnicas y de manera que se obtenga el perfil y la densidad establecidos para la capa que se está construyendo.

En los Artículos 542 y 543 del vigente PG-3, en los apartados 542.5.7 y 543.5.7, relativos a la compactación de la mezcla bituminosa, se prescribe lo siguiente: "**La compactación se realizará según el plan aprobado por el Director de las Obras en función de los resultados del tramo de prueba hasta que se alcance la densidad especificada en los epígrafes 542.7.1 y 543.7.1. Se deberá hacer a la mayor temperatura posible, sin rebasar la máxima prescrita en la fórmula de trabajo y sin que se produzca desplazamiento de la mezcla extendida; y se continuará mientras la temperatura de la mezcla no baje de la mínima prescrita en la citada fórmula de trabajo y la mezcla se halle en condiciones de ser compactada, sin que se produzca desplazamiento de la mezcla extendida. Para las mezclas de capa de rodadura el número de pasadas del compactador, sin vibración, será siempre superior a seis (> 6).**

En mezclas bituminosas fabricadas con betunes mejorados o modificados con caucho y en mezclas bituminosas con adición de caucho, con el fin de mantener la densidad de la tongada hasta que el aumento de viscosidad del betún contrarreste una eventual tendencia del caucho a recuperar su forma, se continuará obligatoriamente el proceso de compactación hasta que la temperatura de la mezcla baje de la mínima establecida en la fórmu-

la de trabajo, aunque se hubiera alcanzado previamente la densidad especificada en los apartados 542.7.1 y 543.7.1.

La compactación se realizará longitudinalmente, de manera continua y sistemática. Si la extensión de la mezcla bituminosa se realizara por franjas, al compactar una de ellas se ampliará la zona de compactación para que incluya al menos quince centímetros (15 cm) de la anterior.

Los rodillos deberán llevar su rueda motriz del lado más cercano a la extendedora; los cambios de dirección se realizarán sobre mezcla ya apisonada, y los cambios de sentido se efectuarán con suavidad. Los elementos de compactación deberán estar siempre limpios y, si fuera preciso, húmedos".

La regla de la extendedora dispone de un sistema de precompactación que, como mínimo, consigue alrededor del 80% de la densidad teórica que hay que conseguir finalmente. Cuando se utilizan reglas de extendido con doble tamper se alcanza prácticamente el 90% e incluso, según el tipo de mezcla bituminosa y el espesor de la capa, se puede llegar a valores próximos a la densidad óptima de compactación.

Las primeras zonas de la capa extendida que se deben compactar son las juntas transversales, las longitudinales y el borde exterior del firme. A continuación se sigue compactando desde la zona más baja hacia la zona más alta, mediante pasadas sucesivas solapándose entre sí y en el número necesario para alcanzar la densidad óptima.

En zonas donde no sea posible acceder con las máquinas de compactación convencionales, se utilizarán máquinas pequeñas e incluso pisonos de mano.

2. problemas en la compactación de las mezclas bituminosas

Una vez extendida en obra la mezcla bituminosa, se procede a su compactación, hasta alcanzar, como mínimo, el por-



Pequeños equipos de compactación para zonas de difícil acceso.

centaje de la densidad de referencia establecido en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares del proyecto o en la normativa vigente. La citada densidad de referencia se obtiene como se describe, en el caso de aplicación del vigente PG-3, en los apartados 542.9.3.2.1 y 543.9.3.2.1.

Posteriormente a la puesta en servicio de la capa construida, la acción del tráfico produce un cierto aumento del proceso de densificación. Por ello, si la mezcla no fue suficientemente compactada, el tráfico puede producir deformaciones superficiales. Por otro lado, si la mezcla se densifica fácilmente por la acción del tráfico, la proporción de huecos puede disminuir a tal extremo, que se puede llegar a perder gran parte del rozamiento interno y acabar produciéndose deformaciones plásticas.

Por estos motivos, deben diseñarse y utilizarse mezclas poco deformables y compactables con dificultad, ricas en árido grueso, duro y de machaqueo, con arena también de machaqueo, y compactarlas mediante el uso de compactadores

potentes que apliquen una gran energía de compactación, de manera que la mezcla sea ya muy poco sensible a la acción del tráfico y que, por tanto, su proporción de huecos permanezca casi inalterable.

Para conseguir la correcta compactación de una capa de mezcla bituminosa, es necesario utilizar la maquinaria adecuada y realizarla de manera que al final se alcance, como mínimo, la densidad óptima de referencia especificada.

La maquinaria de compactación que se utiliza habitualmente son rodillos metálicos lisos que pueden vibrar o no y compactadores de neumáticos con media o alta presión de hinchado. Hay unas máquinas mixtas con rodillo metálico vibratorio en un eje y neumáticos en el otro eje. No es aconsejable ni suficiente utilizar esta máquina sola sustituyendo a las otras dos.

Las mezclas drenantes y las discontinuas en capa delgada se compactan únicamente con rodillos metálicos lisos sin vibración. Solo en algún caso especial (pistas de aeropuertos)



Rodillos metálicos lisos, compactadores de neumáticos y rodillos mixtos utilizados en los equipos de compactación.



Compactación con rodillos metálicos lisos sobre mezclas bituminosas discontinuas.



Compactación con rodillos metálicos lisos sobre mezclas bituminosas discontinuas en pista de aeropuerto y utilización final de un compactador de neumáticos.



Equipos de compactación con diferentes configuraciones y número de máquinas.

puede ser conveniente utilizar un compactador de neumáticos al final de la compactación y cuando la temperatura de la mezcla está ya por debajo de la temperatura de finalización de la compactación.

Según el tipo de mezcla y el espesor de la capa que se va a compactar, el equipo de compactación más adecuado, el número de pasadas, amplitudes y frecuencias de la vibración, presión de inflado de los neumáticos, etc., podrán determinarse según los resultados obtenidos en los correspondientes tramos de prueba, comprobando la densidad conseguida con cada pasada y equipo, determinando las mismas con métodos de isótopos (nuclear) o con equipos no nucleares del tipo PQI (Pavement Quality Indicator) mientras la mezcla es todavía compactable. Posteriormente se comprobarán en laboratorio. Estos tramos de prueba, aunque sean pequeños, son muy convenientes, como se ha descrito en el Capítulo 4 de este documento coleccionable (Revista Asfalto y Pavimentación número 21).

Antes del inicio de la compactación de cualquier capa de mezcla bituminosa, se deberán haber fijado (en base a la experiencia o por el resultado del tramo de ensayo) los puntos siguientes:

- **El número y tipo de compactadores que se van a utilizar.**
- **Su correcto funcionamiento y el de los dispositivos de humectación, limpieza y protección.**
- **El peso total y la presión de inflado, cuando se utilicen, en los compactadores de neumáticos.**

- **La frecuencia y amplitud en los compactadores vibratorios.**
- **El número de pasadas necesarias de cada máquina compactadora que se vaya a utilizar.**

Debe evitarse, en cualquier caso, la compactación a temperaturas por debajo de 90° C (o más concretamente la que, para cada tipo de mezcla bituminosa, establezca la Fórmula de Trabajo correspondiente), porque no será eficaz y no se producirá la necesaria disminución de huecos. Por el contrario, tampoco se debe compactar por encima de la temperatura máxima de compactación establecida en la fórmula de trabajo, para evitar el posible arrollamiento de la mezcla. La compactación debe efectuarse dentro de un intervalo de temperaturas (fijado en la Fórmula de Trabajo) que hay que respetar.

3. Recomendaciones para una buena compactación de las mezclas bituminosas

- La velocidad de todos los rodillos debe ser uniforme y no debe haber cambios bruscos, ni en las trayectorias ni en las inversiones de sentido. Las ruedas motoras, especialmente en las rampas, deben ser las más próximas a la extendidora, para evitar arrollamientos.
- También para evitar arrollamientos con rodillos vibratorios, debe cuidarse que la relación entre el peso del rodillo (P), el ancho del tambor (L) y su diámetro (\varnothing) sea inferior a 0,25:



El tipo y número de máquinas de compactación y su posición respecto a la extendedora deben elegirse de manera que se termine la compactación antes de que la temperatura sea inferior a la mínima de compactación.

- $P / (L \times \varnothing) < 0,25$
- Los tambores de pequeño diámetro no son aconsejables, porque con ellos aumenta el riesgo de arrollamiento.
- Se debe comenzar a compactar por la parte más baja, avanzando hacia la superior, solapando en pasadas sucesivas.
- La compactación de las juntas longitudinales y transversales es muy importante y, para su correcta ejecución, utilizar lo que se ha indicado en el Capítulo 6 de este documento coleccionable (Revista Asfalto y Pavimentación número 24).
- Deben evitarse las paradas de los compactadores sobre la mezcla todavía caliente.
- Si la temperatura ambiente es baja, se debe comenzar a compactar inmediatamente detrás de la extendedora aumentando la velocidad o incrementar los medios para conseguir la compactación necesaria lo antes posible.
- Cuando se usa la vibración, la velocidad es esencial, porque incrementando esta, la distancia entre impactos también se incrementa y, por tanto, el grado de compactación disminuye, por lo que se tendrá que aumentar el número de pasadas. La velocidad más adecuada está entre los 3 y los 5 km/h.
- La frecuencia de vibración debe estar acorde con el tamaño máximo del árido y el espesor de la capa para poder conseguir así la recolocación de las partículas de la mezcla y la consiguiente reducción de huecos.
- En los compactadores de neumáticos es aconsejable empezar con una presión de inflado no muy elevada y acabar con una presión más elevada.
- Los compactadores de neumáticos tendrán las ruedas lisas en número, tamaño y disposición tales que se solape la compactación del tren delantero y la del tren trasero (ruedas delanteras y traseras no alineadas). Deberán llevar faldones de lona protectores para evitar el enfriamiento de los neumáticos.
- La homogeneidad del espesor de la capa y de la subyacente, de la granulometría de la mezcla y de su temperatura, son cruciales para, después de haber compactado correctamente, obtener una superficie con un IRI satisfactorio.
- La necesidad de usar varias máquinas con velocidades y recorridos relacionados se manifiesta debido a la resistencia de la mezcla a la acción del compactador. Esta resistencia depende, en gran medida, de la temperatura, por un lado, y del grado de compactación que se quiere alcanzar, por otro, y en ocasiones, es superior a la acción del compactador, por lo que deberemos sustituirlo por otro más capaz.



Detalle de los neumáticos de los compactadores.

- En los rodillos metálicos lisos vibratorios se deberá ajustar la amplitud y la frecuencia de la vibración en función de las características de la mezcla bituminosa y del espesor de la capa que se está construyendo. Para capas gruesas, es recomendable utilizar amplitudes elevadas y frecuencias bajas. Para capas delgadas, las amplitudes deben ser bajas y las frecuencias elevadas.
- Cuando la mezcla bituminosa se encuentra todavía bastante caliente, el rodillo metálico, al llegar junto a la extendedora, es recomendable variar, antes de invertir el sentido de marcha, ligeramente la dirección de la máquina para impedir su parada perpendicularmente a la regla de la extendedora, evitando así el riesgo del posible arrollamiento de la mezcla, especialmente cuando el maquinista no es muy experto.

#50

AFIRMACIONES ASFÁLTICAS

“Las mezclas asfálticas que combinan técnicas de baja temperatura y de reciclado permiten una mayor reutilización de RAP, consiguiendo grandes ahorros de energía y de recursos y gran reducción de emisiones” (Art. Mezclas bituminosas recicladas semicalientes con espuma de betún, número 21)

#SOSTENIBILIDAD_Y_MEDIO_AMBIENTE

*"reforzamos el firme,
consolidamos el futuro"*
*"by reinforcing pavements,
we guarantee the future"*



asefma



**La asociación del sector con más
impacto del mundo en redes sociales
(índice de Klout 60)**

**The asphalt industry association
with major impact worldwide on social
networks (Klout Score 60)**

Síguenos en: / Follow us on:



@asefma_es
(9,700 followers)



/asefma

www.asefma.es

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE FABRICANTES
DE MEZCLAS ASFÁLTICAS (ASEFMA)

SPANISH ASSOCIATION OF PRODUCERS
OF ASPHALT MIXES

Avda. General Perón, 26
28020 Madrid (Spain)
www.asefma.es

T.: +34 911 293 660
F.: +34 911 293 666
E.: asefma@asefma.com.es





Colección de Monografías, en papel, de Asefma

En estos 10 años, Asefma a través de sus Grupos de Trabajo ha generado una importante colección de monografías.

Ahora se ofrecen en formato papel, dentro de una caja portadocumentos de 30,5 x 21,5 forrada con pliego impreso estucado y plastificado, las primeras 12 monografías publicadas por Asefma.

Aproveche la ocasión de solicitar su colección de Monografías en papel.

Los socios de Asefma tienen un precio especial de **250€, más IVA**. Realice su pedido en asefma@asefma.com.es

MONOGRAFÍAS ASEFMA

Consulte en la web de Asefma los títulos de las 12 monografías

También disponibles en formato DVD

Mezclas templadas con reutilización del RAP con tasa alta y tasa total. Aplicación, experiencias reales y resultados

Jacinto Luis García Santiago, jacintoluis@outlook.com

Francisco José Lucas Ochoa, fjucas@repsol.com

Repsol Lubricantes y Especialidades, S.A.

En la conservación de los firmes bituminosos son frecuentes actuaciones de fresado de las capas deterioradas y su reposición con mezclas nuevas. El fresado genera un material (RAP) de un gran valor técnico y económico, en especial si afecta a las capas superiores, cuya reutilización, dado el valor de los materiales constituyentes, sería muy conveniente en la propia reposición, en cuyo caso se precisarían mezclas recicladas, que incorporen ese material, con prestaciones equivalentes a una mezcla nueva. El RAP producido sólo se absorbería en la reposición con una tasa de reciclado muy alta ó total, más allá de lo conseguible con el reciclado en caliente convencional. De ahí el desarrollo de una nueva mezcla con tasa total de reciclado, reutilizando el 100% de RAP, con un alto nivel de prestaciones mecánicas y funcionales para su empleo en las capas de reposición y fabricada a baja temperatura, a menos de 100° C. Desarrollo que incluye un nuevo método de diseño, que se puede aplicar también a mezclas con tasa alta de reciclado, desde 50%.

Palabras clave: reciclado, baja temperatura, método de diseño

In the asphalt pavements preservation mill-and-fill operation is a common solution, with the removal of the top one or two deteriorated layers and its replacement with new asphalt. The milling operation generates a material (RAP), with high technical and economic value, especially when it comes from the top layers, whose reuse would be highly desirable in their own replacement. In that case, it would require a recycled mix, incorporating such material, with equivalent performance to those that would have a new asphalt mix. To reuse the maximum RAP produced during milling, it would take a very high, or total, recycling rate, beyond what can be achieved with a conventional hot recycling plant. So, the development of an asphalt mix that allows the use of a 100% of RAP, with a high level of mechanical and functional performances for use in the various layers as a replacement, and manufactured at a temperature below 100° C, characteristics that additionally have led to a new design method.

Keywords: milling, low temperature, design method

1. Introducción

La preservación del patrimonio viario exige operaciones planificadas de mantenimiento, entre las que una parte muy importante corresponden a la conservación y rehabilitación de su pavimento, con objeto de mantener unos niveles adecuados en su respuesta funcional y estructural.

La tipología de firme más extendida es aquella en la que las capas superiores están constituidas por mezclas bituminosas; pa-

ra su mantenimiento, una solución habitual y frecuente es la de fresado, retirada de las capas deterioradas y envejecidas y su sustitución (reposición) por mezclas bituminosas de nueva fabricación. Este fresado genera un producto, comúnmente denominado como RAP (Reclaimed Asphalt Pavement), que está constituido por materiales con un valor técnico y económico muy alto, por lo que su reutilización o reciclado es muy conveniente.

En el caso de que el RAP provenga de capas de rodadura o intermedia, con mayor calidad de los materiales

Mezclas templadas con reutilización del RAP con tasa alta y tasa total.

Aplicación, experiencias reales y resultados

constituyentes, hace deseable su reutilización en capas con la misma funcionalidad, para aprovechar el valor de los mismos. Si el material de un fresado de capas de rodadura, por ejemplo, se destina a mezclas recicladas para capas de base se estaría desaprovechando la mayor calidad de los áridos exigidos en aquella.

Una solución adecuada sería la de reutilizar el RAP generado en la propia capa de reposición, evitando residuos o excedentes que podrían destinarse a empleos con menos valorización.

Mezclas utilizables en la reposición, y que puedan incorporar RAP, se encuentran las mezclas recicladas en caliente en planta. No obstante, su tasa de reciclado está limitada (a un 50-60% como máximo ¹) y no permiten un reciclado total, por lo que no es posible con esta técnica volver a colocar en la misma capa todo el RAP generado.

Hay otras técnicas, con capacidad para producir mezclas con tasa total de reciclado, como son las de reciclado en frío con emulsión; sin embargo presentan algunas limitaciones debidas a los períodos de curado y a sus prestaciones mecánicas en los primeros momentos tras su puesta en obra, aunque son indudables sus ventajas de tipo medioambiental.

Así, en la mayoría de los casos, el excedente de material de fresado no reutilizado da lugar a un residuo.

Por ello, es de gran interés el desarrollo de soluciones con mezclas que permitan incorporar tasas hasta alcanzar una tasa total, al 100% y que, a la vez, tenga un alto nivel de prestaciones mecánicas y funcionales, en modo de permitir su empleo en las capas de reposición.

Paralelamente, en los últimos años en España, han entrado con fuerza tecnologías enfocadas a la reducción de temperaturas en la fabricación y aplicación de mezclas bituminosas, por las ventajas aportadas en reducción de emisiones, eficiencia energética y mejora en las condiciones laborales de los operarios de esta industria son las conocidas mezclas templadas con emulsión bituminosa, las cuales se fabrican y aplican por debajo de los 100° C, con unas magníficas prestaciones en lo relativo a puesta en obra y durabilidad.

Estas dos tendencias en desarrollos de mezclas bituminosas para construcción y conservación de carreteras es lo que ha llevado a Sacyr y a Repsol, a explorar, abordar y des-

arrollar, esta tecnología específica, que combina: reciclados a tasa total y reducción significativa de las temperaturas de aplicación.

Además otro de los desarrollos en diseño de mezclas es su aplicación a la producción de mezclas templadas recicladas con tasas altas de RAP, en el rango del 50%, con tecnologías más comunes de fabricación.

En este trabajo se presentan las tres grandes líneas de trabajo y los logros alcanzados en cada una:

- Desarrollo de un nuevo método de caracterización y diseño adecuado de las mezclas templadas con emulsión y RAP.
- La metodología de producción
- Experiencias a escala real de este tipo de mezclas

2. Desarrollo de un procedimiento para el diseño y caracterización de mezclas recicladas templadas con RAP

2.1 Introducción y planteamiento de su desarrollo

En el estudio de las mezclas templadas con tasa total de reciclado, se ha detectado la carencia de un procedimiento adecuado para su diseño y caracterización en laboratorio.

Un aspecto específico de estas mezclas es que el rango de temperaturas previstas para su compactación (70-85 °C), se situaría, en general, por encima del punto de reblandecimiento del ligante viejo del RAP. Por ello, los gránulos del RAP (árido "negro", "black rock") que componen la totalidad de la mezcla, al ser compactados presentarían un comportamiento plástico, deformándose, alejándose del comportamiento de sólido rígido que muestran los áridos, tanto en las mezclas en frío (también el RAP en los reciclados en frío a baja temperatura) como en las mezclas en caliente y reciclados en caliente (en los que se llega a la temperatura de fusión del ligante).

Por ello el estudio se basó en desarrollar una metodología que permita obtener en laboratorio resultados comparables posteriormente en obra.

Para asegurar la veracidad en la reproducibilidad de los resultados obtenidos en el laboratorio, se procede a compa-

¹ No se contempla la técnica muy minoritaria, de empleo de plantas con calentamiento por microondas, que permiten tasa total.

rarlo con valores obtenidos en obra a través de testigos extraídos de la obra.

Este desarrollo se ha planteado con varias etapas interrelacionadas:

- Estudios previos de laboratorio para caracterización del fresado, estudio y elaboración de probetas con distintos metodologías, análisis de las propiedades de la mezcla y elección de una formulación para prueba preliminar de campo.
- Fabricación y puesta en obra de mezcla desarrollada en el laboratorio, con diversos espesores de capa y testificación de la misma. Retroanálisis a partir de los especímenes obtenidos, a efectos de identificar parámetros definitorios de la energía de compactación en laboratorio de probetas y metodología a seguir.

Así, una vez validado el procedimiento, ya se podría proceder a definir y concretar la metodología de diseño más adecuada.

Posteriormente, sobre las mezclas extendidas, sería necesaria una etapa de realización y seguimiento de tramos de ensayo. En el esquema siguiente se secuencian las fases indicadas.

2.2 Definición de las condiciones de fabricación y normativa de ensayo

Empleando RAP de fresados de distintas procedencias (diferentes en cuanto a composición granulométrica y estado de envejecimiento del ligante) y diferentes emulsiones, en cuanto al tipo de ligante residual final, grado de concentración y agentes de control de rotura, se han combinado con diversas dosificaciones para la obtención de mezclas.

Con cada una de ellas, en primer lugar se ha procedido al estudio de envueltas, manejabilidad, temperaturas de mezcla y compactación. De todas las condiciones ensayadas, se eligió la que podría considerarse cercana a unas condiciones convencionales de obra; como consecuencia se fijó para la mezcla templada la temperatura de la emulsión en 50° C, la de calentamiento del RAP entre 90-100° C, la de mezcla entre 80-90° C y la de compactación sobre 70° C.

Se han utilizado y comparado varios sistemas de compactación de probetas que pueden existir en un laboratorio tipo (Compresión estática por doble émbolo NLT-162, Prensa giratoria UNE EN 12697-31 e Impactos UNE EN 12697-30), a diferentes energías, con diferentes tipos de emulsión (rejuvenecedora, alta con-



Mezclas templadas con reutilización del RAP con tasa alta y tasa total. Aplicación, experiencias reales y resultados

centración, ligante convencional...), para determinar cuál es el sistema más idóneo y cuál es la energía de compactación para obtener probetas con un nivel de huecos finales que sean representativos con lo que se va obtener a escala real.

Las probetas obtenidas se han ensayado para obtener sus propiedades mecánicas (Módulo de rigidez a tracción indirecta, a 20° C, según UNE EN 12697/26 Anexo C, Resistencia a tracción indirecta, a 15° C, según UNE EN s/ 12697/23), contenido de huecos, resistencia a la acción del agua, etc y compararlas con las de testigos obtenidos de obra.

Tras estos estudios previos, se seleccionó una formulación con un 3% de emulsión rejuvenecedora para realizar el primer tramo de prueba a escala real, para testificación.

Aunque la mezcla reciclada templada es totalmente diferente a una reciclada en frío, con el único fin de tener valores de referencia para comparar con los que marca la Tabla 20.2 del

PG4 para Reciclado en Frío con Emulsión, se realizó el ensayo de Inmersión-Compresión según NLT 162 y NLT 161, obteniendo unos valores de resistencia en seco de 4.7 Mpa, resistencia en húmedo de 4.4 Mpa y un porcentaje de resistencia conservada del 93,6%, todos ellos muy superiores a los mínimos exigidos para la mayor de las categorías de tráfico pesado.

Se ha desarrollado un procedimiento de diseño y caracterización de un Reciclado Templado con Emulsión, realizándose los trabajos necesarios en los laboratorios del Centro Tecnológico de Repsol y de Sacyr.

2.3 Tramos de prueba

Con la mezcla seleccionada citada se realizó una prueba a escala real, con fabricación, extensión y compactación en octubre de 2010.



Figura 1: Fotografías del tramo de prueba inicial para testificación y retroanálisis (Octubre 2010).



Figura 2 : Segundo tramo de prueba para validación del diseño (Junio 2011).

Se extendieron dos franjas con distintos espesores de mezcla, empleándose compactación convencional, con rodillo metálico vibrante y un compactador de neumáticos, con temperatura de mezcla, al inicio de compactación, alrededor de los 80° C.

Para comparar con los resultados de laboratorio se procedió al día siguiente del extendido a la extracción de testigos sobre los que se midieron espesores, densidades, módulos de rigidez a tracción indirecta y resistencias a tracción indirecta en seco.

Este análisis indicó que de los diferentes tipos de compactación analizados en el laboratorio, con la compactación giratoria se obtuvieron unas densidades y propiedades mecánicas similares a las conseguidas en obra. A partir de aquí se establece la energía de compactación más adecuada para el diseño.

Para confirmar los resultados se realizó un segundo tramo, a escala real, para la comprobación de la mezcla fabricada y de la resultante en la capa, en relación con la previsión de la formulada en laboratorio.

Los resultados indicaron la idoneidad del procedimiento.

2.4 Procedimiento de diseño

Este procedimiento es aplicable a mezclas con una tasa mínima de material procedente de fresado de mezclas bituminosas del 80%, admitiéndose hasta un 20% de árido virgen, por si es preciso su adición para corregir alguna característica.

El proceso de diseño se describe en el diagrama reflejado en la Figura 3.

Caracterización del fresado y granulometría de la mezcla

El RAP se caracteriza mediante la granulometría de la mezcla (en blanco) y con el contenido y tipo de ligante. Debido al desmenuzamiento del RAP que se efectúa en el mezclador de la plan-

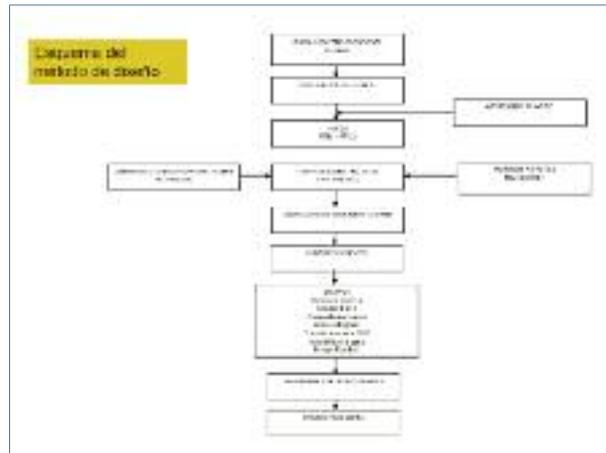


Figura 3 .- Esquema de diseño.

ta al estar a una temperatura por encima de la de reblandecimiento de su ligante, no se considera útil la granulometría en negro (como se haría en los reciclados en frío con emulsión).

Sobre el ligante se determina su contenido de betún, y sobre el residuo extraído la penetración y punto de reblandecimiento.

Sobre el árido obtenido de la extracción se determinan sus propiedades a efectos de validar su utilización (salvo constancia de esos datos en las mezclas fresadas).

Con ello, se definen los tramos homogéneos en modo similar a lo especificado en el apartado 22.2.3.1 del Artículo 22 (Reciclado en caliente) del PG.4

Elaboración y curado de probetas:

La mezcla se realiza con el RAP calentado a 95° C +/- 5C y la emulsión a 50° C.

La compactación de la mezcla se realiza utilizando el compactador giratorio, según UNE EN 12697-31, aplicando 65 giros y evitando compactar en todo momento por debajo de los 70° C.

Las probetas fabricadas se someterán a un periodo de curado de tres días a 50° C en estufa de convección forzada, antes de proceder a la realización de ensayos.

Ensayos a realizar

Para cada porcentaje de emulsión se realizarán los siguientes ensayos:

Mezclas templadas con reutilización del RAP con tasa alta y tasa total.

Aplicación, experiencias reales y resultados

- Determinación de la densidad aparente, según UNE EN 12697-6.
- Determinación densidad máxima, según UNE EN 12697-5.
- Contenido en huecos, según UNE EN 12697-8.
- Determinación de la resistencia a tracción indirecta a 15° C, s/ UNE EN 12697-23.
- Determinación de la sensibilidad al agua a 15° C, según UNE EN 12697-12.
- Modulo de Rigidez a tracción indirecta, según UNE EN 12697-26 Anexo C.

Elección de la formulación óptima

La determinación del óptimo de trabajo se realiza mediante las curvas de contenido de huecos en mezcla, resistencia a tracción indirecta y módulo de rigidez frente a cada contenido de emulsión.

En la elección de la formulación, se maximizarán las propiedades más deseables, en función de la aplicación prevista ya que los valores de los rangos de las características exigibles aún no están definidos. No obstante, se proponen los siguientes criterios:

- Huecos en mezcla comprendidos entre 2,5 y 4%.
- Resistencia a la tracción indirecta mayor de 2 MPa o de 1,5 MPa, conforme al tipo de tráfico que soportar.
- Sensibilidad al agua, resistencia conservada superior al 90%.

Con el óptimo de ligante calculado, se procede a realizar el ensayo de rodadura, UNE EN 12696-22, compactando las probetas en el compactador de placas según UNE EN 12697-33. La densidad s.s.s de las probetas para el ensayo de rodadura debe ser superior al 98% de la densidad obtenida en las probetas cilíndricas preparadas con 65 giros en la prensa giratoria.

Con los mismos criterios de densidad, en su caso, se realiza el ensayo de fatiga s/ UNE EN 12697-24 (anexo D).

3. Estudio de diseño y formulación de una mezcla reciclada a tasa total

Como ejemplo, se describe la aplicación del procedimiento descrito en el diseño de una mezcla reciclada a tasa total para obtener sus características.

3. 1 Material de fresado y composición

El material de fresado de mezclas bituminosas (RAP) corresponde al caracterizado y acopiado, proveniente del fresado de mezclas bituminosas de zonas homogéneas de las obras en ejecución en la A1, en la provincia de Burgos.

El ligante recuperado presenta una penetración media a 25° C de 17 dmm y una temperatura de punto de reblandecimiento A&B de 67,3° C.

El RAP antes de su incorporación, se disgrega y se separa y clasifica en dos fracciones, 5/25 mm y 0/5 mm, para ser dosificadas con un control ponderal.

La granulometría en negro resultante, encaja en los husos granulométricos considerados adecuados (Tabla 20.1 del Art. 20 del PG-4).

Por ello se establece que el control de ajuste de la granulometría del RAP se haga con las curvas obtenidas tras extracción de ligante. Así la mezcla de las fracciones del RAP pretratado (fracciones 0/5 y 5/25 mm) se ha analizado mediante análisis granulométrico sin ligante.

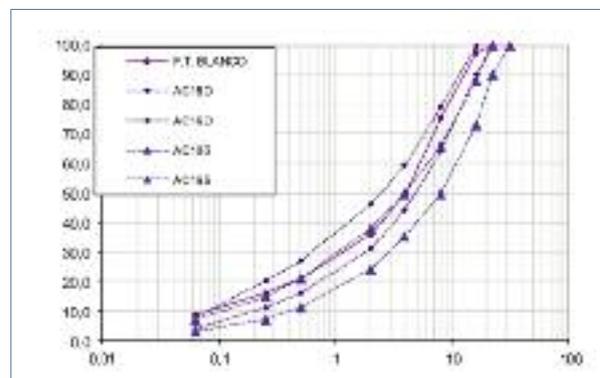


Figura 4 : Huso granulométrico en BLANCO, tras extracción.

La dosificación de RAP empleada para todos los estudios han sido un 40% de 0/5 mm y un 60% de 5/25 mm.

3.2 Ligantes

Se han considerado dos tipos de emulsiones, una con ligante residual rejuvenecedor de penetración relativamente alta (160/220) y otra con ligante residual convencional de penetración relativamente baja (50/70), con similares porcentajes de concentración de ligante residual.

Tabla 1: Propiedades de las emulsiones.

Propiedad	Norma NLT	Unidad	Rejuvenecedora	Convencional
Viscosidad Saybolt-Furol 25° C	138	s	26	23
pH	195		3,0	3,0
Contenido de agua	137	%	39,0	38,8
Tamizado	142	%	0,01	0,01
Residuo por destilación	139	%	61,1	61,2
Fluidificante en volumen	139	%	0,0	0,0
Penetración del residuo 25° C, 100 g, 5 s	124	1/10 mm	183	66

Las emulsiones empleadas tienen las características recogidas en la Tabla 1.

3.3 Dosificación y características de la mezcla

Una vez evaluados los resultados con cada porcentaje de emulsión y tipo, se obtuvo un porcentaje óptimo del 2,5% para ambas emulsiones. La caracterización de ambas mezclas se resume en las tablas que indican las Tablas 2 y 3.

Se han realizado los ensayos de rodadura (UNE 12697-22), aunque, dado el interés potencial de empleo de estas

mezclas en capas intermedias, en las que hay una reducción sensible de temperatura respecto a la superficie, se profundizó el estudio para conocer la influencia de la temperatura de ensayo (50° C y 60° C) y tipo de emulsión en los resultados de dicho ensayo de pista.

Se ha determinado la ley de fatiga, según UNE EN 12697-24 Anexo D, con el porcentaje óptimo de emulsión convencional y rejuvenecedora, según tipo $y=a*x-b$.

La formulación con emulsión de ligante residual B50/70, cuyas características se remarcan en sombreado en las tablas anteriores ha sido la seleccionada para los tramos experimentales.

Tabla 2: Caracterización de mezclas.

	Mezcla reciclada templada	
	ECL2 reju	ECL2 50/70
Tipo de emulsión	ECL2 reju	ECL2 50/70
Contenido de emulsión	2,5%	2,5%
Ensayo de Inmersión-Compresión (NLT162) Resistencia en seco (MPa) Resistencia conservada	4,7 93,6%	
Res. Tracción indirecta a 15° C (Mpa) (UNE EN 12697-23)	1,69	2,13
Resistencia acción del agua, IRC (%)	96,1	97,6
Módulo de rigidez a 20° C a tracción indirecta (Mpa) (UNE EN 12697-26 anexo C)	2.638	2.891
Módulo dinámico a compresión a 20°C (NLT349) (Mpa) / ángulo desfase (°)	8.166 / 17	9.964 / 16,5

Mezclas templadas con reutilización del RAP con tasa alta y tasa total. Aplicación, experiencias reales y resultados

Tabla 3: Ensayo de Rodadura y Leyes de fatiga.

Parámetros		Mezcla reciclada templada	
Tipo de emulsión		ECL2 reju	ECL2 50/70
Contenido de emulsión		2,5%	2,5%
Ensayo de rodadura (UNE 12697-22)			
WTS a 60° C		0,122	0,109
WTS a 50° C		0,114	0,068
Ensayo de fatiga (UNE EN 12697-24)			
Módulo en flexión (Mpa)		5.936	6.331
Eε		130	143
y = a * x - b	a	0,0015	0,0015
	b	0,177	0,170

4. Tecnologías de producción de mezclas templadas con RAP

4.1 Reciclados templados a tasa total

Con respecto a otras mezclas bituminosas, las templadas a tasa total de reciclado presentan algunas singularidades y problemas específicos que condicionan de modo importante tanto el proceso de fabricación como las tecnologías que pueden aplicarse. En el caso que se presenta, se han resuelto satisfactoriamente tras un importante desarrollo, orientado a resolver aspectos como:

- **Calentamiento directo del material de fresado (RAP).** Al no poder utilizar el sistema de transferencia de calor desde áridos sobrecalentados, como ocurre con las mezclas recicladas en caliente, el calentamiento del RAP se hizo directamente con los gases del tambor secador, pero con un sistema apropiado para evitar sobrecalentar el ligante. Éste es un requisito fundamental, pues una degradación del betún viejo del RAP afectaría muy negativamente a las características finales de la mezcla como un deficiente comportamiento a bajas temperaturas y baja cohesión. Por ello, se comprobó el calentamiento del RAP toman-

do muestras antes y después y comparando sus propiedades entre ambas muestras.

En este caso, el sistema empleado es uno específico para calentamiento del RAP, un tambor calentador de flujo paralelo (el material avanza en el mismo sentido que los gases calientes), con cámara de combustión retrasada, en el que el calentamiento del RAP se hace por gases calientes, pero sin contacto ni proximidad a las llamas del quemador o zonas de alta temperatura. Además, consta de una entrada diferenciada de fracciones de RAP, de modo que la que presenta mayor sensibilidad por su mayor superficie expuesta y contenido de ligante, la fracción fina, se incorpora en la zona más avanzada con menor temperatura.

- **Pegajosidad del RAP caliente.** También se ha procedido al diseño de un método de almacenamiento y dosificación del RAP en la planta discontinua dado los problemas presentados con el ligante entre los 80° C - 100° C.
- **Desmenuzamiento del RAP.** Es clave para conseguir una mezcla adecuada con el ligante nuevo. Este desmenuzamiento se asegura combinando una temperatura en el RAP por encima del punto de reblandecimiento de su ligante junto con la aplicación de una alta energía de mezclado.

- **Clasificación del RAP.** Otro aspecto crítico en una mezcla con tasa de reciclado total, es el de la regularidad de las características del RAP y su fraccionamiento para asegurar la precisión y uniformidad de la composición de la mezcla.

La clasificación del RAP se realizó en dos fracciones (0-6 y 6/25 mm) que se adiciona en la planta con un control ponderal en su proporción en la mezcla a fin de asegurar la regularidad de composición.

Las características más reseñables de la planta de fabricación son:

- Planta de fabricación de mezclas en caliente en proceso discontinuo de 260 tns hora de capacidad, de doble tambor
- Instalación de tratamiento y clasificación del material de fresado, en línea con el proceso de fabricación de mezclas recicladas compuesta de:
 - Reducción de tamaños de material de fresado superiores al especificado (25 mm como estándar) mediante rotor granulador, específico para RAP.
 - Clasificación del RAP en dos fracciones (0/6 y 6/25), almacenamiento temporal en tolvas de regulación para alimentación con control ponderal de cada una.
 - Entrada de fracciones de modo diferenciado en el tambor secador, dando mayor tiempo de residencia a la fracción gruesa para asegurar el calentamiento uniforme de la misma.

- Sistema de by-pass de alimentación de material dosificado, sin paso por el secadero, para incorporación de RAP en frío al mezclador (caso de tasas de 10% de fresado).
- Tolva de almacenamiento de RAP caliente y sistema de pesado, para alimentación discontinua a mezclador.

En la adaptación para fabricación de reciclados templados se ha incorporado:

- Depósitos y circuito de alimentación de emulsión a báscula de ligante.
- Dispositivos adicionales de regulación de aspiración de gases en tambor secador.
- Circuito adicional para recirculación parcial de gases calientes del tambor secador de RAP, para mejora de aspiración, recuperación parcial de energía térmica y sustitución de aire fresco secundario para regulación de temperatura, por aire reciclado pobre en oxígeno.
- Modificaciones en los diseños iniciales de recorrido de RAP caliente para resolución de la pegajosidad más acentuada del RAP en el rango de los 90° - 100° C.

4. 2 Reciclados templados a tasa alta. (≥50%)

En el caso de tasas mayores del 50% en plantas discontinuas con incorporación de RAP frío al mezclador, se puede realizar con un sobrecalentamiento de los áridos, de poco más de 200° C (Figura 8).

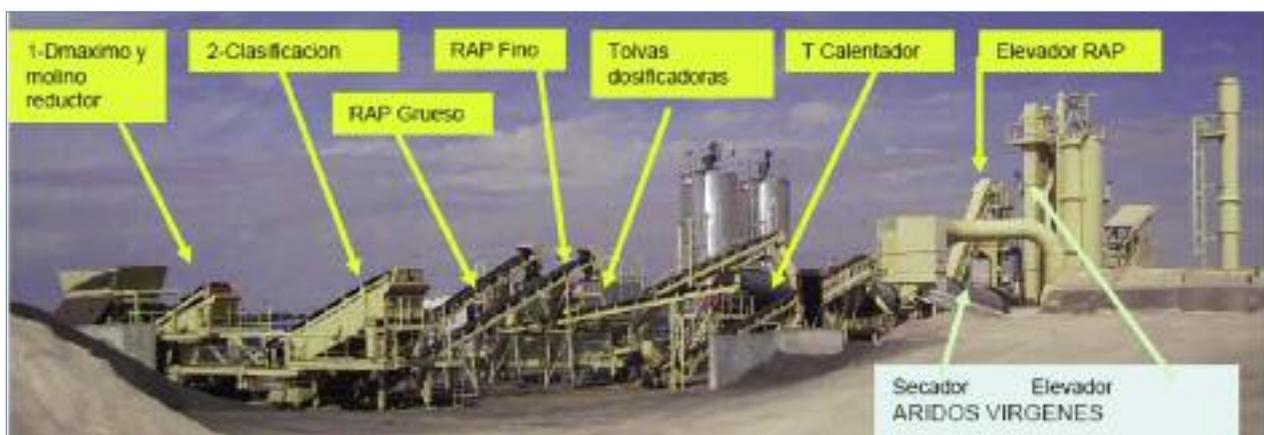


Figura 5- Panorámica del sistema de pretratamiento y proceso del RAP.

Mezclas templadas con reutilización del RAP con tasa alta y tasa total. Aplicación, experiencias reales y resultados

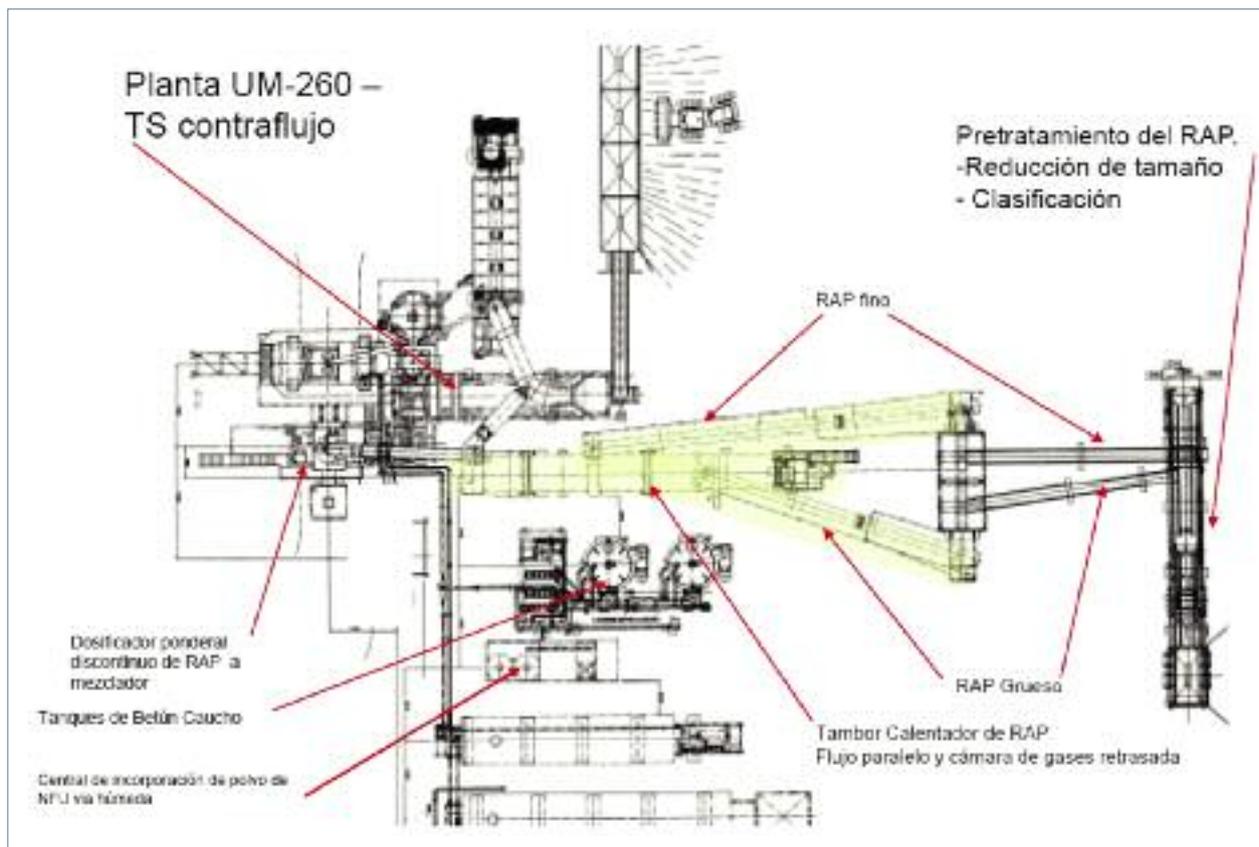


Figura 6- Planta de la disposición de elementos de la instalación.

También con esta tasa es importante tener en cuenta los mismos condicionantes que los indicados para la tasa total, sólo que en este caso hay que tener en cuenta el tiempo necesario de la mezcla en seco de los áridos sobrecalentados y del RAP, previo a la incorporación de la emulsión. Este tiempo adicional supone una reducción del rendimiento, pero es imprescindible para asegurar la homogeneidad del mortero y del ligante en el total de la mezcla.



Figura 7: Fracciones de RAP clasificado: aportación a tolvas dosificadoras.

5. Experiencias a escala real de mezcla templada reciclada a tasa total

La mezcla aplicada fue una AC16 D con 100% de RAP procedente del tramo de la Nacional I a rehabilitar utilizando la emulsión con betún base 50/70.

5.1 Tramo Experimental Autovía de Arlanzón (Burgos)

Se propuso y aprobó por la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento la ejecución de un primer tramo experimental dentro de la concesión de las obras de la Autovía A1, en Burgos, que gestiona Sacyr.

Al no existir normativa que indique en qué capas se puede aplicar reciclado templado, y por imperativos contractuales, se ha tenido que ser conservador y aplicar al reciclado templado los criterios que se indican en el apartado 7.4. de la Norma 6.3- IC para los reciclados en frío in situ, a pesar de que las propiedades mecánicas del reciclado templado a ta-

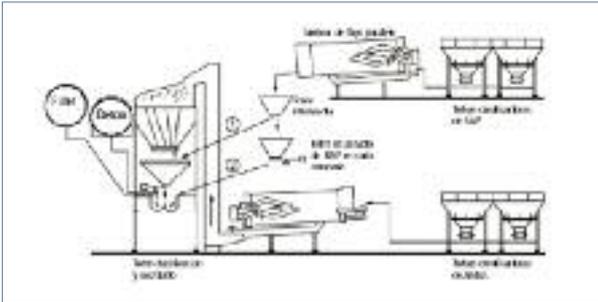


Figura 8 Esquema de fabricación, incorporando RAP clasificado y predosificado al mezclador, con control ponderal.

sa total son superiores. En dicho artículo se indica que para categoría de tráfico T2, se podrá colocar la mezcla reciclada en frío in situ en la calzada, siempre que lleve capa de roda-

dura encima. La sección tipo del tramo experimental consiste en un fresado de 5 cm del firme existente, una reposición con el reciclado total templado y la posterior extensión de una capa de rodadura con mezcla bituminosa convencional, cumpliendo así lo indicado por la Norma 6.3-IC.

Además de la formulación con el 2.5% de emulsión indicadas en el Apdo. 3.3, se dispuso una sección con mezcla con el 3%, a efectos de evaluar su potencial mejora de cohesión y resistencia a la fisuración reflejada al situarse la reposición en una sección de firme semirrígido.

Previamente a la ejecución del tramo aprobado en la Vía de Servicio, se procedió a la realización de otro tramo de prueba, en un vial secundario, en el que se terminaron de ajustar todos los parámetros de la mezcla y proceso de aplicación.



Figura 9: Mezcla reciclada templada a tasa total. Ausencia total de humos. Tª salida mezclador: 94.2°C.



Figura 10: Extendido de la MBT R100 en la capa intermedia de reposición y Termograma de la mezcla a salida de regla.

Mezclas templadas con reutilización del RAP con tasa alta y tasa total. Aplicación, experiencias reales y resultados

Características de la Mezcla Reciclada fabricada

El Centro Tecnológico de Repsol realizó la caracterización de las mezclas fabricadas. Se evaluaron muestras de material fresado todo uno, material fresado seleccionado en fracciones 0/6 mm y 6/25 mm, mezcla reciclada templada y testigos extraídos del tramo experimental. Los resultados en el control de los dos tipos de mezclas fabricadas, reflejaron una dosificación precisa de las fracciones de fresado por la planta de fabricación, tanto en la granulometría de mezcla obtenida y su regularidad como en la dosificación de la emulsión bituminosa y contenidos de ligante final:

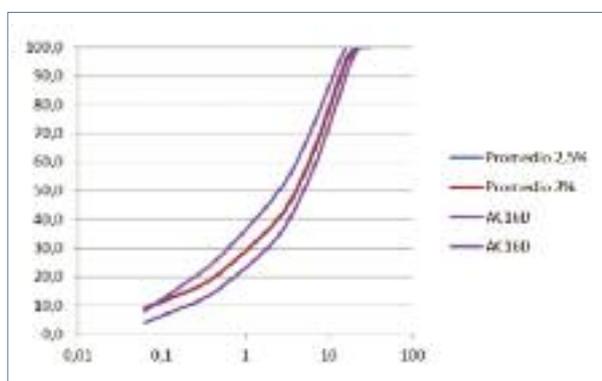


Figura 11: Curvas granulométricas.

Los datos obtenidos en los ensayo de Sensibilidad al Agua de probetas fabricadas con la mezcla reciclada templada, según Norma UNE EN 12697-12, dieron como resultado valores promedio de 92,3% para la formulación con el 2,5% de emulsión y de 96,5 para la mezcla con el 3%

Ensayos de Testigos de Obra

Los resultados obtenidos de los ensayos realizados sobre testigos extraídos de obra arrojan resultados óptimos en cuanto a Resistencia a Tracción Indirecta, Ensayo de Módulo de Rigidez y Sensibilidad al Agua. El dato de Huecos en Mezcla



Foto 12: Testigo de obra con MTR a tasa total.

Tabla 4: Contenido de ligante.

Contenido de ligante soluble s/mezcla	MRT 2,5% Promedio	MRT 3% Promedio
% Ligante s/a	5,85 ± 0,29	6,19 ± 0,1

Tabla 5: Resultados ensayos sobre testigos.

Resultados/Testigo PROMEDIO	MRT 2,5%	MRT 3%
Altura, mm	53,6	55,2
Densidad s.s.s., g/cm ³	2.309	2.250
% Huecos mezcla, % VM	5,2	7,4
Modulo rigidez 20° C, MPa	4.758	3.431
Resistencia Tracción Indirecta Seco, MPa	2,64	2,29
Resistencia Tracción Indirecta Húmedo, MPa	2,38	2,16
% RC	90,2	94

Tabla 6 Contenidos de Ligante de muestras de la mezcla fabricada.

Contenido de ligante soluble	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Promedio
% Ligante s/a	6,12	6,11	6,46	5,70	6,10 ± 0,3

Tabla 7. Caracterización del ligante.

Ensayo	MRT 2,5%	Material reciclado
Penetración, 25° C, 0,1 mm	15	14
Punto Reblandecimiento, °C	70,7	82,6

es adecuado y, como es lógico, algo superior al obtenido en la Fórmula de Trabajo.

5.2 Tramo Experimental A-231 (Palencia)

Con la misma formulación del 2,5% de emulsión sobre betún B50/70 utilizada en el tramo realizado en la A1, a finales de agosto, se procedió a realizar un segundo tramo experimental, esta vez en la Autovía A-231, en la capa intermedia del carril rápido de la calzada, correspondiente a la Dirección General de Carreteras de la Junta de Castilla y León.

Se controló de modo similar al tramo antes descrito.

Los datos que se extraen del análisis del ligante recuperado de la mezcla (Tabla 8) indican, respecto del ligante que contiene la mezcla envejecida, un leve incremento de la Penetración y una disminución significativa del Punto de Reblandecimiento (A y B).

Tabla 8. Resultados de los ensayos de mezcla templada con RAP

Promedio	2,5%
Altura, mm.	50,2
Densidad s.s.s., g/cm ³	2.193
% Huecos Mezcla, %VM.	9,6
Modulo Rigidez 20° C, MPa	2.587
Resistencia Tracción Indirecta Seco, MPa	1,21

Ensayos sobre testigos de obra

Los resultados obtenidos de los ensayos realizados sobre testigos extraídos arrojaron resultados de Sensibilidad al Agua superiores al 95% , a pesar de tener un contenido de Huecos en Mezcla (9%) muy superior al obtenido en la Fórmula de Trabajo. En cuanto a ensayos de Módulo de Rigidez y Tracción Indirecta, lógicamente los datos son inferiores a los esperados.

6. Aplicación en obra de reciclado templado a tasa del 50%

En la rehabilitación de un tramo de la A231, categoría de tráfico T1, en la provincia de Palencia, llevada a cabo en 2012, se ha empleado en la capa de base una mezcla templada con emulsión, con tasa de reciclado del 50%, tipo MBT AC22 BASE C67B7 G R50.

La rehabilitación implicó la retirada por fresado de parte del paquete de mezcla bituminosa para ejecutar un reciclado in situ con cemento (prefisurado) del espesor residual de asfalto y el suelo cemento subyacente. Sobre éste se colocaron mezclas bituminosas, siendo las de la capa de base mezclas recicladas templadas al 50% con emulsión como ligante, en la capa intermedia mezclas recicladas en caliente al 25% con ligante tipo BC, y en rodadura una mezcla discontinua BBTM. El total de mezclas sumaba un espesor de 18 cms., correspondiente a una sección con categoría de tráfico T1.

Este fresado se acopia y caracteriza a través de su granulometría, tras extracción del ligante, y del contenido y características de éste. La penetración del betún del RAP resultó

Mezclas templadas con reutilización del RAP con tasa alta y tasa total. Aplicación, experiencias reales y resultados



Figura 13. Instalaciones utilizadas en la A231. Fraccionamiento de RAP y fabricación de mezcla.



Figura 14. Extendido de la capa de base MBT AC22 con 50% RAP.

de 13,5 mm/10. Dada la procedencia (capas de firme bituminoso de la autovía), no fue necesario caracterizar el árido recuperado, ya que procedía o de capas de rodadura o de las mismas capas en que se iba a reutilizar. El RAP obtenido del fresado del tramo a rehabilitar se procesó en un equipo con molino específico desmenuzador (Figura 13), obteniéndose dos fracciones, 0-5 mm y 5-22 mm.

Con estas fracciones de RAP y áridos vírgenes silíceos, se hizo el estudio de formulación de la mezcla, siguiendo un protocolo como el ya indicado en la mezcla de tasa total.

La formulación obtenida tenía una aportación de un 3,2% s/a de emulsión tipo C67B7, con un contenido total de ligante del 4.2% s/a, un contenido de huecos del 6%, un resultado en el ensayo de sensibilidad al agua del 86% y, en el ensayo de rodadura, una pendiente de deformación en pista, WTS Aire, de 0,099 mm/10³ ciclos.

El procedimiento que se empleó para fabricar la mezcla, consistió en predosificar en la proporción prevista (en este caso 44% y 56%) cada fracción del RAP, incorporan-

do a esta mezcla, a temperatura ambiente y con control ponderal, al mezclador al tiempo que los áridos vírgenes, que se han calentado a una temperatura superior a la habitual (sobre 215° C), para obtener la temperatura requerida en la mezcla. (según el esquema de la Figura 8). Se dispone un tiempo de mezcla en seco mayor del normal, para conseguir homogeneizar la temperatura de mezcla y el disgregado total, en caliente, del RAP. Una vez conseguido esto, se procede a la adición del ligante y resto del proceso de mezclado.

7. Conclusiones

- El desarrollo de las mezclas recicladas templadas con emulsión bituminosa supone una apuesta decidida por la sostenibilidad del patrimonio viario, en base a reutilizar los materiales del propio firme y en la reducción de temperaturas en su fabricación y aplicación.
- Se ha propuesto una metodología específica de diseño en laboratorio de mezclas recicladas templadas a tasa total y tasa alta, dado que los métodos tradicionales no responden adecuadamente a su diseño, por las características de este tipo de mezclas.
- La producción de estas mezclas, necesariamente deben llevar incorporadas tecnologías industriales, que sean capaces de transferir calentamiento al material fresado sin deteriorar su ligante.
- En el caso de tasa total el calentamiento del RAP se hace de modo directo.
- En caso de reciclados de tasa alta la producción es viable en una gama de plantas más convencional, derivadas de las de reciclado en caliente.

- En la fabricación, antes de incorporar la emulsión, hay que asegurar que se ha realizado un desmenuzado adecuado del RAP.
- La ejecución de estas mezclas, no lleva asociada diferencias respecto a la ejecución de mezclas bituminosas en caliente, aportando la ventaja de menor gradiente de enfriamiento en su puesta en obra.
- Los tramos experimentales realizados, a la fecha de redacción del presente artículo, tras dos años en servicio, presentan muy buen comportamiento, sin indicio de deformaciones u otra patología en ambos tramos.
- Sería deseable la consideración de este tipo de mezclas en capa de rodadura en la realización de nuevos tramos experimentales, que permitan seguir conociendo su comportamiento y su campo de aplicación.
- Mezclas recicladas templadas con tasa de 50% se han colocado en la capa de base de un tramo rehabilitado de la A231.

8. Agradecimientos

Los autores, quieren expresar su agradecimiento, a todos las administraciones, organizaciones y profesionales, que, al margen de las áreas técnicas de Sacyr Construcción y Repsol, han colaborado en el desarrollo de este proyecto cuya duración ha sido de más de cuatro años:

- Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento
- Dirección de Carreteras de La Junta de Castilla y León
- Cedex
- Sacyr Concesiones
- Universidad Politécnica de Cataluña
- Universidad Alfonso X El Sabio

- Ideyco
- Áreas de Producción y Ejecución de Sacyr Construcción
- Áreas Comerciales y de Producción de Repsol Lubricantes y Especialidades, S. A.

9. Bibliografía

- (1) Dirección General de Carreteras, M° Fomento: "Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes" PG-3. 2004.
- (2) Dirección General de Carreteras, M° Fomento: Norma 6.3-I.C. "Rehabilitación de firmes" 28 de Noviembre, 2003.
- (3) Dirección General de Carreteras, M° Fomento: "Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de conservación de carreteras" PG-4. 18 de enero de 2002.
- (4) García Santiago, J.L. et al. "Rehabilitación sostenible de pavimentos" 6º Congreso de Ingeniería Civil de Valencia, 2011.
- (5) García Santiago, J.L. et al. "Influencia de la temperatura de mezcla en las propiedades mecánicas del reciclado en frío" Congreso Latinoamericano del Asfalto. Brasil, 2011.
- (6) García Santiago, J.L., "Reutilización y reciclado de materiales en la conservación de firmes" Jornada Técnica ACEX. Vitoria, 2011.
- (7) García Santiago, J.L. et al. "Reciclado Total de Mezclas Bituminosas a baja temperatura. Una propuesta para su diseño, caracterización y producción" Jornada Técnica Asefma. Madrid, 2011.
- (8) Páez Dueñas, A et al. "Reciclado en frío in situ de Altas prestaciones. Experiencias y resultados." Congreso de Firmes, Valladolid, 2008.
- (9) Soto, J.A., et al.. "Mezclas Bituminosas adaptadas al cambio climático" Valladolid, 2010.

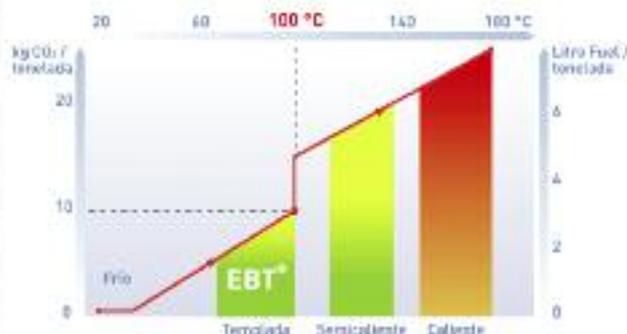
#43

AFIRMACIONES ASFÁLTICAS

“Las rodaduras asfálticas proporcionan una superficie suave y confortable que reduce el consumo de los vehículos y sus emisiones”
(Editorial, número 20)

#SOSTENIBILIDAD_Y_MEDIO_AMBIENTE

Con las Mezclas Templadas con Betún,
el código de la circulación ha cambiado.



Mezclas Templadas con Betún, una nueva generación de mezclas asfálticas

Para un futuro más responsable, Eiffage Infraestructuras ha desarrollado las mezclas templadas con betún. Fabricada a menos de 100 °C y aplicada hasta 75 °C, esta mezcla templada a baja temperatura posee cualidades excepcionales :

- un consumo de energía dos veces inferior al de una mezcla convencional,
- una disminución del 50 % de las emisiones de gas de efecto invernadero,
- un confort de aplicación inigualable.

Premio Mundial AIPCR 2007
del desarrollo sostenible

www.infraestructuras.eiffage.es

EIFFAGE
INFRAESTRUCTURAS

RUS
EIFFAGE INFRAESTRUCTURAS

TRIALSA
EIFFAGE INFRAESTRUCTURAS

PANASFALTO
EIFFAGE INFRAESTRUCTURAS

LOS SERRANOS

Captación de energía solar térmica mediante pavimentos asfálticos

Christian Cortés - Servià Cantó - ccortesfu@fcc.es
J. M. Cadenas - Servià Cantó
C. García - Collosa
D. Castro - GITECO, Universidad de Cantabria
P. Pascual - GITECO, Universidad de Cantabria
A. Vega - GITECO, Universidad de Cantabria
J. J. Potti - Proyecto Fénix

La red de carreteras española tiene una longitud superior a 160.000 km, correspondiente a autopistas, autovías y carreteras de una calzada, cuya misión es servir de soporte para el transporte de personas y mercancías. Existen estudios estimando que la superficie de las carreteras españolas recibe cada día de verano radiación solar equivalente a 7.000 GWh. Sin embargo, no existe ningún procedimiento capaz de aprovechar dicha energía, o al menos parte de ella, recibida sobre la superficie de la carretera. La tecnología que se describe en esta publicación es un sistema diseñado para capturar y almacenar la energía solar térmica irradiada sobre la superficie de la carretera para su posterior uso. El trabajo experimental realizado se ha centrado en el estudio de los rendimientos de captación energética y en el almacenamiento de la energía captada. Asimismo, se ha construido un tramo de prueba para verificar los resultados que se habían obtenido a escala de laboratorio. Las conclusiones más relevantes son que es posible la captación de la energía solar térmica mediante un pavimento por el que circula un fluido caloportador, alcanzándose rendimientos cercanos al 70% respecto a la energía irradiada sobre la superficie del pavimento.

The Spanish road network has a length of more than 160,000 km, including motorways and single carriageway roads, whose mission is to provide support for the transport of people and goods. Some studies estimate that each summer day the surface of Spanish roads receives solar radiation equivalent to 7,000 GWh. However, there is no procedure that can exploit this energy, or at least part of it, received on the road surface. The technology described in this publication is a system designed to capture and store solar energy irradiated on the surface of the road for later use. The experimental work has focused on studying the performance of energy and storage of the captured energy. It has also constructed a test section to verify the results that had been obtained at laboratory scale. The most relevant conclusions are that it is possible the capture of solar energy by mean of pavement through which circulates a heat transfer fluid, achieving yields close to 70% compared to the energy radiated on the pavement surface.

1. Introducción

Existen cálculos estimando que la superficie de las carreteras españolas recibe cada día de verano una radiación solar equivalente a unos 7.000 GWh (PVGIS, 2007). Esta cantidad es 200 veces superior a la energía diaria generada por la central nuclear de Santa María de Garoña, Burgos (España). Sin embargo, no existe ningún procedimiento que permita el aprovechamiento de esta energía.

Las carreteras reciben diferentes tipos de energía durante su vida útil, que pueden ser objeto de reutilización o de aprovechamiento. Entre los mismos, cabría destacar:

- La energía solar que recibe la superficie del aglomerado asfáltico, que dependiendo de la longitud de onda, se podría dividir en energía térmica y energía procedente de otras longitudes de onda (UV, etc).
- La energía mecánica procedente de las cargas y vibraciones de los vehículos que circulan por la superficie de la carretera.

Dentro de este contexto ha surgido el concepto de "Energy Harvesting", consistente en el posible aprovechamiento de estos tipos de energía, dando de esta manera un valor añadido a la carretera.

Captación de energía solar térmica mediante pavimentos asfálticos

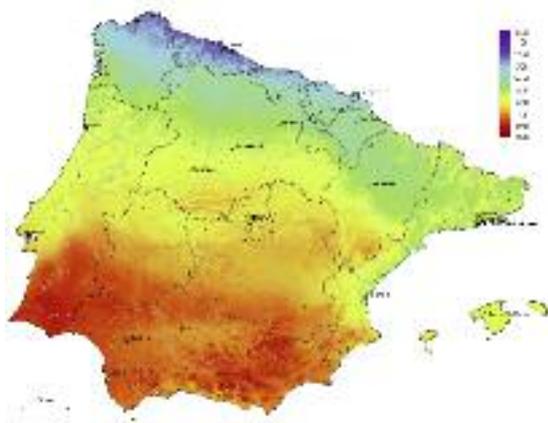


Figura 1. Niveles de irradiación solar en la Península Ibérica.

Centrándonos en el caso de la energía solar térmica, considerando que la temperatura de la superficie del pavimento es, generalmente, entre 20 y 30 °C superior a la del aire, debido a la absorción de la energía solar, especialmente en verano, (Ongel, A. and Harvey, J.T., 2004) se puede plantear la posibilidad de aprovechar este tipo de energía.

Aunque no excesivamente numerosos, existen diversos antecedentes de aprovechamiento de la energía solar térmica recibida por los pavimentos. Sokolov y Reshef (1992) y Chaurasia (2000), mediante la colocación de tubos embebidos en bloques de hormigón, propusieron la utilización de éstos como colectores solares activos, proveedores de energía para, por ejemplo, calentar el agua o climatizar una vivienda a un coste bajo. Bilgen y Richard (2002), en cambio, estudiaron experimental y teóricamente la acción de la radiación solar sobre una losa de hormigón (funcionando como colector solar pasivo), estableciendo la influencia relativa de algunos parámetros en su comportamiento térmico.

La primera referencia de aplicación práctica de estas técnicas encontrada entre la bibliografía proviene de finales de los años setenta, en Estados Unidos, donde una patente con título "Paving and solar energy system" (Wendel, 1979) muestra un método para calentar el agua de una piscina haciendo circular este a través de unos tubos que pasan bajo un pavimento expuesto al sol.

Desde 1994, la planta piloto SERSO, ubicada en Suiza, previene la formación de hielo en un puente de autopista. Este sistema capta el calor absorbido por el pavimento en verano mediante unas tuberías de metal embebidas en él y lo almacena en tubos taladrados en la montaña a una cierta

profundidad. Durante el invierno, ese calor mantiene la temperatura del puente por encima del punto de congelación.

En Japón, el sistema denominado GAIA funciona con éxito en la ciudad de Ninohe desde 1995. Esta instalación está compuesta por unas tuberías embebidas en el pavimento, que captan parte de la energía solar absorbida por este, transportándolo a un intercambiador de calor coaxial enterrado en los alrededores, donde se almacena. En invierno, esta energía calorífica pasa por una bomba de calor y se hace circular a través de las tuberías situadas bajo el pavimento evitando su congelación.

Pero el principal avance llevado a cabo en este campo desde hasta la fecha ha llegado de la mano de la utilización de dicha energía para la climatización de edificios. Países Bajos y Reino Unido han sido las puntas de lanza de esta tecnología en Europa.

En Países Bajos, la investigación llevada a cabo por empresas y universidades ha sido muy amplia. Cabe destacar, en primer lugar, el estudio llevado a cabo por Van Bijsterveld et al. (2001), en el que se analiza el comportamiento de un colector asfáltico compuesto de tubos de material polimérico en su interior y la influencia en la distribución de temperaturas a través del asfalto de parámetros, tales como: profundidad de los tubos, distancia entre ellos o caudal del fluido a través de ellos. De este trabajo nacen los colectores asfálticos denominados "Road Energy System (RES)". Este sistema, desarrollado entre los años 1997 y 2001, consiste en una capa de mezcla bituminosa reforzada mediante una rejilla (grid) y atravesada por unos tubos para la conducción del agua. Además, el desarrollo de los RES trae aparejado un análisis estructural más profundo que el realizado previamente (Van Bijsterveld y De Bondt, 2002).



Figura 2. Colector asfáltico en Rotterdam (De Bondt, A. y Jansen, R., 2006).

En el Reino Unido, la evolución de estos sistemas ha sido muy pareja a la de los Países Bajos y la tecnología denominada "Interseasonal Heat Transfer" supone el mayor adelanto en este campo. Este sistema utiliza un pavimento asfáltico para captar energía procedente del sol y lo almacena en el terreno, de manera que puede utilizarse en invierno para acondicionar edificios. El sistema funciona también de manera inversa, refrigerando los edificios en verano. Un proyecto de este tipo, implementado en el colegio de primaria Howe Dell (ICAX, 2007), provee de calefacción y refrigeración al edificio durante todo el año.

Además del uso de la energía almacenada para el posterior acondicionamiento de edificios, otra de las ventajas de este tipo de colectores es el mantenimiento de la carretera (p.e. prevención de fisuras), sin olvidar, por supuesto, la reducción de las emisiones de CO₂, gracias al menor uso de combustibles fósiles.

Todas las referencias anteriormente citadas se basan en el uso de algún tipo de conducto embebido en la matriz del pavimento. Algunos autores (Van Bijsterveld et al. 2001) se han centrado en investigar el efecto que la presencia de tubos de polietileno provoca en la estructura del pavimento. El análisis realizado por Van Bijsterveld y De Bondt (2002) coincide con el artículo anterior, al determinar que la presencia de tubos en el asfalto influye negativamente en la durabilidad de la estructura del pavimento.

Además, estos sistemas presentan importantes problemas tecnológicos y funcionales a resolver. El primero de ellos es la baja eficiencia que ofrecen estos sistemas de captación, que se encuentra en torno al 25%. Ello se debe principalmente al bajo rendimiento de transmisión térmica causado por la reducida superficie de contacto entre los tubos por los que circula el fluido caloportador y el material que conforma el pavimento. Es decir, se desaprovecha una gran parte de la superficie potencial de irradiación.

El segundo problema es la dificultad constructiva resultante al tener que embeber la red de tuberías por debajo de la superficie del pavimento. La técnica actual exige colocar los tubos de forma plegada para maximizar la superficie de contacto y utilizar una malla soporte hasta que se vierte el material de pavimentación (mezcla bituminosa u hormigón) que constituye la base principal del pavimento. Asimismo, los tubos no pueden colocarse muy cerca de la superficie porque el peso de los vehículos podría dañarlos, de modo que tienen

que colocarse a cierta profundidad, lo que repercute negativamente en el rendimiento del sistema.

El tercer problema lo forman las dificultades de mantenimiento y la poca fiabilidad de funcionamiento. Cualquier avería en la red de tuberías, por pequeña que sea, implica tener que levantar el pavimento, sustituir o reparar la tubería dañada y pavimentar de nuevo la zona afectada. A su vez, la rotura de un solo tubo corta toda la circulación del fluido caloportador, provocando una avería general que significa la interrupción de todo el sistema. A dichos inconvenientes hay que añadir las dificultades de reciclar cualquier material de la red de tuberías, ya que su separación respecto del pavimento es complicada, y en muchas ocasiones destructiva.

Teniendo en cuenta todos estos antecedentes, el desarrollo del trabajo objeto de esta publicación se estructuró de acuerdo a la siguiente secuencia:

- Verificación experimental de los modelos de captación y cesión de calor.
- Desarrollo y evaluación de sistemas de captación de energía solar térmica y su posterior almacenamiento.
- Diseño y construcción de un prototipo de pavimento captador de energía equipado con sistemas de monitorización y control.

2. Desarrollo de nuevos sistemas de captación y almacenamiento

2.1 Sistema de captación

La primera fase del trabajo de investigación se centró en el estudio del comportamiento térmico de diversas mezclas bituminosas bajo condiciones de irradiación solar similares a las que nos podemos encontrar en España. Dichos estudios de Pascual et al. (2008, 2009 y 2010) tenían como objeto poder modelizar el comportamiento térmico de un pavimento cuando está sometido a irradiación solar y cuando cesa ésta. Entre las variables estudiadas cabe estudiar la influencia del tipo de mezcla asfáltica, la distribución de temperaturas en función de la profundidad o la intensidad de color negro en la superficie.

Junto al análisis térmico de los diseños seleccionados también se efectuó un análisis estructural para verificar la respuesta mecánica de los sistemas de captación de calor a las cargas aplicadas por los vehículos que circulan sobre el pavi-

Captación de energía solar térmica mediante pavimentos asfálticos

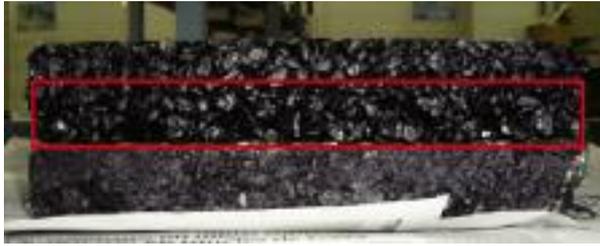


Figura 3. Probeta de pavimento sandwich.

mento. Las conclusiones a este análisis están basadas en los resultados obtenidos en la simulación por ordenador con programas de elementos finitos y la realización de diferentes ensayos de laboratorio.

La conclusión alcanzada fue que el desarrollo de captadores térmicos basados en tubos incrustados dentro del pavimento tenía graves contraindicaciones y que, aun mejorando los diseños existentes, no se vislumbraba una capacidad de mejora destacable. La principal limitación de los sistemas basados en tuberías es la falta de superficie de contacto entre el fluido caloportador y el pavimento, además del inconveniente adicional que supone la colocación de los tubos a una profundidad relativamente grande, que reduce más aún el rendimiento de captación térmico.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, surge la idea de combinar la capacidad de conducción hidráulica de las mezclas porosas junto con otros tipos de mezclas asfálticas. Esta conjunción de propiedades provocó la aparición del concepto de pavimento "sandwich", que consiste en:

- una capa superior configurada para absorber la energía solar irradiada sobre la superficie de captación;
- una capa intermedia de carácter poroso, dispuesta bajo la capa superior, configurada para permitir la libre circulación a través de la misma de un fluido caloportador que recibe la energía solar absorbida por la capa superior y la transporta hasta un módulo de almacenamiento o directamente hasta un módulo de aprovechamiento energético.
- una base inferior impermeable y con capacidad portante, dispuesta bajo la capa intermedia, configurada para impedir las infiltraciones del fluido caloportador que fluye sobre dicha base inferior y capaz de soportar el peso de todas las capas que se encuentren por encima de la misma, así como todas las cargas de los vehículos que circulen por el pavimento.

La característica esencial es que el fluido caloportador circula libremente a través de la capa intermedia, fluyendo sobre la base inferior hasta el módulo de almacenamiento o de aprovechamiento energético, sin necesidad de emplear una red de tuberías para ello. De este modo, el fluido caloportador aprovecha toda la superficie de captación, recibiendo la energía solar absorbida por la capa superior y transportada hasta la capa intermedia.

La siguiente fase de la experimentación consistió en la construcción de probetas bajo el concepto de pavimento sándwich. Con dichas probetas se buscaba estudiar, a escala de laboratorio, la capacidad de captación térmica del fluido que circula por la capa drenante. Dichas probetas tienen unas dimensiones de 30 x 40 cm² (Figura 3). En los primeros ensayos se emplearon capas drenantes con un contenido de huecos del 23 y del 27%. La energía irradiada estuvo en el rango 300-450 W/m², dependiendo de la tipología de las probetas y del caudal de agua que circulaba por la capa drenante.



Figura 4. Ensayo termohidráulico.

Los resultados obtenidos para las probetas con un 23% y un 27% de huecos se pueden ver en la Figura 5.

De dichos datos mostrados en la Figura 5, destaca el porcentaje de rendimiento obtenido, llegándose a captar un 80% de la energía irradiada. También se observa que, al aumentar el caudal (aumentando el porcentaje de huecos de la mezcla porosa), mejora sensiblemente el rendimiento térmico de captación.

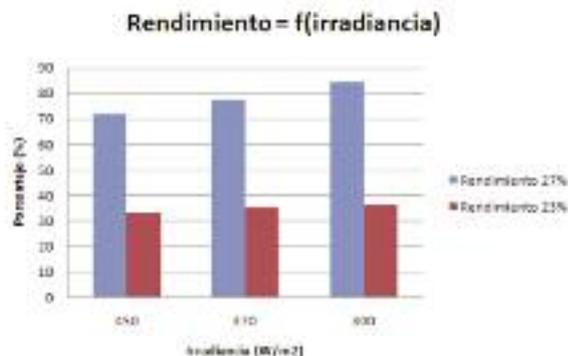


Figura 5. Comparación de los rendimientos de los dos tipos de probetas.

Durante el desarrollo de esta serie de ensayos surgió la necesidad de analizar otras variables que podrían ser críticas en el proceso de escalado. La primera era la posibilidad de incrementar el caudal de agua mediante una ligera presurización (0.06 bar). La segunda era comprobar la linealidad de los caudales en función del camino recorrido.

Para resolver estas cuestiones, se construyeron nuevas probetas en las que, manteniendo el porcentaje de huecos de la mezcla porosa, se duplicó la longitud (30 x 80 cm) y se impermeabilizaron con tela asfáltica para evitar fugas de fluido al presurizar la circulación de agua. Este último experimento no tuvo éxito, ya que aparecieron numerosas fugas de agua. Los resultados de variación de caudales en función del tiempo se muestran en la Figura 6 (probetas sin presurizar).

Los resultados obtenidos permiten concluir que, a partir de las 2 horas de ensayo, los valores de caudal, gradiente de temperatura y potencia de salida obtenidos para la probeta

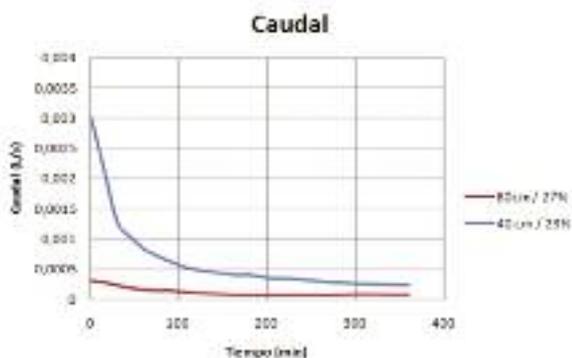


Figura 6. Representación del caudal en las probetas de 40 cm y 23% de huecos y de 80 cm con 27% de huecos.

larga con 27% de huecos se acercan a los obtenidos en los ensayos para la probeta corta con 23% de huecos.

2.2 Sistema de almacenamiento

La energía proveniente del sol es intermitente (meteorología, ciclos noche y día, movimientos de traslación de la tierra, etc.), por lo que la mayoría de los sistemas de captación de energía solar llevan asociado un sistema de almacenamiento para satisfacer las demandas energéticas en el momento que éstas sean requeridas. De este modo, se evitan las fluctuaciones de suministro, haciendo posible el uso energético posterior a su captación. También aporta una mayor efectividad al sistema térmico, reduciendo las pérdidas de calor residual al existir un medio de almacenamiento.

Los sistemas de almacenamiento de calor son variados y responden a las diversas tecnologías desarrolladas en el campo de la energía solar y geotérmica. El almacenamiento de la energía solar, se puede hacer de las siguientes formas (Fernández. 1997):

- En forma de calor sensible, en el que el calor almacenado aumenta la temperatura de un medio líquido, sólido o gaseoso.
- En forma de calor latente, como la energía almacenada hasta alcanzar la temperatura a la cual se produce el cambio de estado de una sustancia.
- En forma de calor sensible y latente, en el que el calor almacenado entraña una variación de temperatura y un cambio de estado del sistema receptor (sólido o líquido); la restitución del calor corresponde al cambio de estado inverso.
- En forma de energía química originada en algunas reacciones químicas.
- En forma de energía mecánica, que se puede transformar en energía potencial mediante el almacenamiento de fluidos a ciertas alturas.
- En forma de sustancias obtenidas en procesos solares no energéticos, como el agua destilada en un alambique solar que se puede almacenar en depósitos para su utilización posterior.

En nuestro caso concreto, se ha estudiado la posibilidad de almacenar calor sensible en la subbase de un firme per-



Figura 7. Sistema de almacenamiento de energía térmica de laboratorio.

meable, compuesta por grava y agua. En la fase de ensayos de laboratorio se ha construido un depósito de dimensiones $0,5 \times 0,5 \times 0,68 \text{ m}^3$, de material rígido e impermeable, recubierto con material aislante en todas sus caras, excepto en la superficie.

La primera capa, en la superficie, corresponde a un pavimento permeable, consistente en una mezcla porosa PA12. Las capas sucesivas están formadas por gravilla, un geotextil de separación y zahorra.

Durante los ensayos se aplica calor desde el interior del depósito mediante una resistencia eléctrica que simula la introducción de un intercambiador de calor, por cuyos tubos circula el agua caliente proveniente del colector solar. Se realizaron medidas de temperatura en diferentes puntos del depósito en función de los flujos de calor aplicados. También se recogieron medidas de nivel de agua en la base del firme po-

roso para obtener datos de pérdidas por evaporación de agua, así como datos sobre temperatura del aire y humedad.

Las temperaturas programadas para los ensayos fueron de $30 \text{ }^\circ\text{C}$ y $50 \text{ }^\circ\text{C}$. El proceso calentamiento se produce hasta conseguir un equilibrio en las temperaturas medidas en las cuatro sondas con las que está equipado el depósito. A continuación se cesa el proceso de calefacción y se registra el proceso de enfriamiento. Las curvas de enfriamiento se registran a partir del instante en que las tres sondas de temperatura superiores alcanzan la temperatura establecida para cada ensayo durante el calentamiento, asumiendo que el depósito se encuentra en estado estacionario a la temperatura de equilibrio correspondiente.

La temperatura alcanzada a la altura de las cuatro sondas durante los periodos de calentamiento y enfriamiento del depósito refleja la poca estratificación producida, es decir, flujos convectivos lentos donde puede asumirse que el fenómeno predominante de transmisión de calor es debido a conducción y el modelo mixto de las leyes de mezcla en la transferencia de calor resulta apropiado. Los resultados del cálculo del rendimiento del sistema durante el calentamiento para cada ensayo realizado se representan en la siguiente figura.

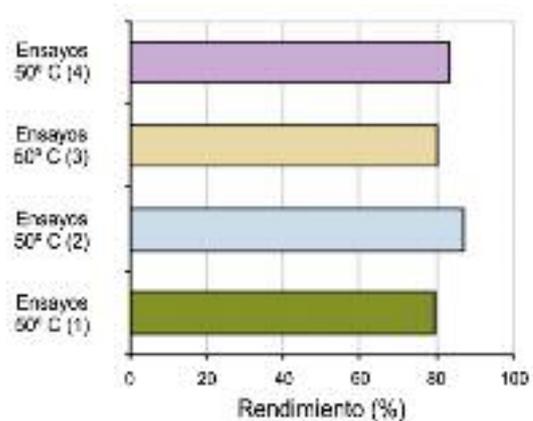


Figura 8. Rendimiento del calor almacenado durante el calentamiento.

2.3 Tramo de ensayo

Una vez analizados los datos recogidos en los estudios de laboratorio, se llegó a la conclusión de que era posible escalar el proceso. La realización del tramo de prueba se basó en un diseño que integra la captación y el almacenamiento. El circuito diseñado consiste en un circuito primario en el que la ener-

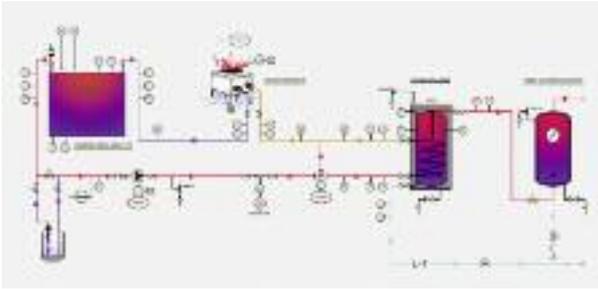


Figura 9. Esquema del sistema de captación-almacenamiento del tramo de prueba.

gía captada por el módulo de captación se envía a un módulo de almacenamiento capaz de ceder la energía al sistema de agua sanitaria de un edificio (Figura 9).

El módulo de captación consiste en una superficie de 6 x 8 m, que recoge la irradiación solar y transmite la energía al fluido caloportador (agua). Este fluido intercambia la energía recibida con el sistema de agua caliente sanitaria en el módulo de almacenamiento. Además se ha incluido en el sistema un aerogenerador que nos permite modificar la demanda final de energía que se le exige al sistema. De esta manera, y mediante las sondas de control instaladas, podemos estudiar el rendimiento energético de todo el sistema.

El módulo de captación se subdivide en 4 secciones para estudiar diferentes escenarios de captación de energía a escala real. En la capa drenante de la primera sección se dispone un contenido en huecos del 35%. Esta sección trabaja con una presión de 0,7 bares. Las dos siguientes secciones trabajan sin presión e incluyen capas drenantes con contenidos de huecos del 35 y del 30%, respectivamente. La última sección corresponde a una capa de grava con un 45% de huecos.

Para conseguir un buen funcionamiento del módulo de captación se ha procedido a la impermeabilización de la base del tramo y de la parte superior de las capas drenantes. El módulo de prueba se ha diseñado para que cada sección pueda trabajar con o sin presión e independiente del resto. De esta manera, podemos definir diferentes escenarios de trabajo y comprobar cómo se comporta el sistema en los mismos.

Los resultados obtenidos hasta el momento permiten certificar que es factible extraer energía del aglomerado asfáltico irradiado por el sol. En la actualidad se está monitorizando el tramo de prueba en diferentes condiciones ambientales externas.



Figura 10. Detalle de las cuatro secciones del tramo de prueba.

3. Conclusiones

A continuación se extraen las principales conclusiones del estudio llevado a cabo:

- Los rendimientos obtenidos en los diferentes ensayos acometidos con la probeta sándwich son muy elevados, con valores alrededor del 80% para la configuración del 27% de huecos en la probeta de 40 cm.
- El valor del caudal obtenido cuando la probeta alcanza el régimen permanente o cuasi-permanente es muy pequeño.
- Los valores bajos de caudal hacen disminuir el rendimiento del sistema de captación, incluso con el aumento de la radiación sobre la probeta.
- Los resultados muestran que se puede obtener un rendimiento de calor aportado al sistema del 70-80% durante el calentamiento hasta la máxima temperatura del rango de operación.
- A partir de las 2 horas de ensayo, los valores de caudal, gradiente de temperatura y potencia de salida obtenidos para la probeta larga, con 27% de huecos, se acercan a los obtenidos en los ensayos para la probeta corta, con 23% de huecos.
- Es factible el aprovechamiento energético de la radiación solar recibida sobre un pavimento de aglomerado asfáltico.

4. Agradecimientos

La realización del Proyecto Fénix (www.proyectofenix.es) ha sido posible gracias a la contribución financiera del Centro para el Desarrollo Tecnológico e Industrial (CDTI), dentro del

Captación de energía solar térmica mediante pavimentos asfálticos

marco del programa Ingenio 2010 y, más concretamente, a través del Programa CENIT. Las empresas y centros de investigación que participan en el Proyecto desean mostrar su gratitud por dicha contribución.

Los autores quieren agradecer a todas las organizaciones y empresas participantes del Proyecto Fénix: Centro de Investigación Elpidio Sánchez Marcos (CIESM), Centro Zaragoza, Construcciones y Obras Llorente (Collosa), Ditecpesa, Asfaltos y Construcciones Elsan, Intrame, Pavasal, Repsol YPF, Sacyr, Servià Cantó, Sorigué, CARTIF, CEDEX, CIDAUT, CSIC (IIQAB), GIASA, Intromac, Tecnalia, Universidad de Alcalá de Henares, Universidad Carlos III de Madrid, Universidad de Castilla-La Mancha, Universidad de Huelva, Universidad de Cantabria, Universidad Politécnica de Cataluña, Universidad Politécnica de Madrid, y a sus numerosos colaboradores, cuya capacidad de trabajo y eficacia están permitiendo el desarrollo de este proyecto en un ambiente de cooperación.

5. Referencias

- Bilgen, E. y Richard, M.A. (2002). *Horizontal concrete slabs as passive solar collectors*. Solar Energy, 72 (5): 405-413.
- Chaurasia, P. B. L. (2000). *Solar water heaters based on concrete collectors*. Energy, 25 (8), 703-716.
- ICAX. Interseasonal Heat Transfer. (2007). Howe Dell School. Renewable energy for schools. http://www.icax.co.uk/howe_dell_school.html. [Consulta: 31 de Julio de 2009].
- De Bondt, A. y Jansen, R. (2006). *Generation and saving of energy via asphalt pavement surfaces*. Avenhorn (Países Bajos): Ooms Avenhorn Holding .
- Fernández, P. (1997). *Energías Renovables*. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética. Universidad de Cantabria.
- Ongel, A. and Harvey, J.T. *Analysis of 30 Years of Pavement Temperatures using the Enhanced Integrated Climate Model (EICM)*. Draft report prepared for the California Department of Transportation. Pavement Research Center, Institute of Transportation Studies, University of California Berkeley, University of California Davis. UCPRC-RR-2004/05
- Pascual, P., Vega, A., Rodríguez B, J., Rodríguez H, J. , Castro, D., Serrano, P., Cortes, C., García, C., Álvarez, S., Potti, J.J. " *Pavimentos asfálticos sostenibles*". VIII Congreso Nacional de Firms. Valladolid, 21-23 de Octubre de 2008.
- Pascual, P., Rodríguez, J., Castro, D., Serrano, P.: *Metodología para el estudio del comportamiento térmico de firmes destinados a la captación de energía solar*. XV Congreso Ibero-Latino Americano del Asfalto. Lisboa 23-27 noviembre 2009.
- Pascual, P., Vega, A., Rodríguez, J., Castro, D., Serrano, P., Rodríguez, J., Cortés, C., García, C., Álvarez, S., Peña, J.L. " *Sustainable asphaltic pavements: getting energy from the roads*". IRF 16th World Road Meeting Proceedings". Lisbon 25-28 may 2010. Paper nº 517. p.p.911-918.
- PVGIS, 2007.<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/> (Último acceso: 1.5.2011)
- Sokolov, M. y Reshef, M. (1992). *Performance simulation of solar collectors made of concrete with embedded conduit lattice*. Solar Energy, 48(6), 403-411.
- Van Bijsterveld, W.T., Houben, L.J.M., Scarpas, A. y Moleenaar, A.A.A. (2001). *Using Pavement as Solar Collector. Effect on pavement temperature and structural response*. Transportation Research Record, 1778(17): 140-148
- Van Bijsterveld, W.T. y De Bondt, A. (2002). *Structural aspects of asphalt pavement heating and cooling systems*. Amsterdam (Países Bajos): Third International Symposium on 3D Finite Element Modeling, Design & Research.
- Wendel, I.L. 1979. *Paving and solar energy system and method*. Estados Unidos, patente de invención número 4.132.074, 1979-01-02.

#14

AFIRMACIONES ASFÁLTICAS

“Las mezclas asfálticas son 100% reciclables en nuevas mezclas” (EAPA)

#SOSTENIBILIDAD_Y_MEDIO_AMBIENTE

Captación de energía en la carretera mediante transductores piezoeléctricos

Antonio Pérez Lepe, aperezlepe@repsol.com
Centro de Tecnología Repsol

Silvia Hernández Rueda
Centro de Tecnología Repsol

María Ángeles Izquierdo Rodríguez
Centro de Tecnología Repsol

José Francisco Fernández Lozano, jfernandez@icv.csic.es
CSIC Instituto de Cerámica y Vidrio

Alberto Moure Arroyo, alberto.moure@icv.csic.es
CSIC Instituto de Cerámica y Vidrio

María Pilar Ochoa Pérez, pilar.ochoa@upm.es
Universidad Politécnica de Madrid

Domingo Urquiza Cuadros, durquiza@ceis.es
Centro de Ensayos, Innovación y Servicios (CEIS)

El diseño de las carreteras se centra fundamentalmente en la función de soporte a los vehículos (necesidades mecánicas) y las funciones de seguridad y confort. En las últimas décadas, otras funcionalidades y propiedades, una vez superadas las anteriores, han cobrado importancia: disminución de la huella ambiental en todo el ciclo de vida, rodaduras especiales, eliminación de gases nocivos (NO_x), captación de energía... Es esta última línea la que explora el presente trabajo, donde se presentan los resultados más relevantes del proyecto REC (Roads as energetic roads), el cual intenta cambiar el concepto de infraestructura de transporte hacia el concepto de infraestructura activa e inteligente. El reto acometido es el de captar energía mecánica vibracional mediante la incorporación de elementos piezoeléctricos bajo la rodadura de la carretera. El trabajo concluye con que la tecnología de almacenamiento de energía a partir de pulsos generados por el tránsito de vehículos es viable y competitiva.

Palabras clave: energía, inteligente, piezoeléctricos, carretera

The design of a highway is mainly focused on the structural or mechanical needs to sustain traffic as well as safety and comfort issues. Over the past few decades, other properties and functionalities have called the attention for many research groups: low-CO₂ footprint, special surfacing and wearing courses, NO_x reduction, energy harvesting... The latter line is explored in the present work, where the main results of project REC (Roads as energetic crops) are delivered. The project tries to shift a surface transport infrastructure towards the concept of active and intelligent infrastructure. The challenge is to harvest vibrational mechanical energy through piezoelectric elements under the surface of the road. The main conclusion is that the technology for the storage of energy upon the generation of single pulses under vehicle traffic is viable and competitive.

Keywords: energy, intelligent, piezoelectric, highway

1. Introducción

Las carreteras convencionales se centran en dar soporte a los vehículos, atendiendo únicamente (salvo casos excepcionales) a las necesidades mecánicas necesarias para cumplir esta función, y además a la seguridad y el confort, dos de los factores más valorados por los usuarios finales de la carretera. Existen en la actualidad proyectos y tendencias tecnológicas innovadoras que tratan de dotar a las carreteras con nuevas propiedades y características, más allá de su uso tradicional como soporte del tráfico rodado. Ejemplo de ello lo constituyen las numerosas funcionalidades de que se están dotando las capas de rodadura de las carreteras: eliminación de gases nocivos, disminución de ruido, drenabilidad del agua, menor consumo de combustible, mayor durabilidad, color, etc. Una referencia clara de estos esfuerzos en I+D fue el proyecto cénit "Fénix", en España, y otros proyectos en Europa, EEUU o Latinoamérica.

El objetivo a largo plazo del presente artículo es cambiar y extender el concepto de infraestructura de transporte hacia el concepto de infraestructura activa e inteligente. Para ello se han evaluado todas las opciones de captura de energía, aprovechando todos los factores y posibilidades energéticas que posee la infraestructura, además de los usos potenciales de dicha energía.

Así, en el caso del asfalto, en la carretera nos encontramos con una estructura multicapa, con una superficie oscura expuesta al sol, con un movimiento continuo de vehículos transmitiendo presión y energía cinética, con unas presiones que bajan hasta el terreno a través de sus capas semi-rígidas, con una fricción importante entre el neumático y la superficie, y con una red física interconectada de muchos kilómetros cuadrados.

Cuando un vehículo pasa por encima de una carretera, se genera una pérdida de energía por parte del vehículo (unos 400-500 kilovatios por kilómetro), que de ser recuperada equivaldría al consumo medio de entre 600 y 800 hogares o sería suficiente para alimentar 9 vehículos eléctricos pequeños. Al igual que este tipo de energía mecánica, también es aprovechable la energía cinética de los vehículos, el rozamiento, la acumulación de calor, etc. Muchos son los esfuerzos tecnológicos por parte del sector automovilístico para capturar parte de esta energía por el propio vehículo, pero pocos o ninguno han invertido esfuerzo innovador en la infraestructura.

De este modo, mediante la incorporación de nuevas tecnologías en la construcción de cualquier tipo de vía de forma que se pudiera recuperar y canalizar la energía "perdida" por los vehículos, las carreteras cumplirían con los principios de un desarrollo energético sostenible. El proyecto REC "Roads as energetic crops" se enmarca dentro de la disciplina de captación de energía residual, o Energy Harvesting. Como si de un campo de cultivo se tratara, la carretera se sembrará de receptores y captadores de energía de bajo voltaje, desde los cuales se irá recolectando energía, que de otro modo se perdería, para alimentar diferentes dispositivos. Pero, ¿de qué energía puede disponerse en la carretera y para qué usos sería conveniente?

- Posibles Fuentes aprovechables de energía: Energía Solar Térmica; Energía Solar Fotovoltaica, Energía Mecánica: fricción superficial; Energía mecánica: vibración aprovechada desde el vehículo; Energía mecánica: vibración aprovechada sobre la carretera; Energía mecánica cinética: elementos circundantes a la carretera o en el propio vehículo; Energía Electromagnética por Inducción: alimentación de baterías de coche eléctrico en movimiento; Energía Termoeléctrica por gradientes de temperatura.
- Posibles Usos de la energía recuperada: Independientemente del proceso captador de energía, ésta puede ser empleada para diversos usos, entre los que se contemplan los siguientes, en función de la cantidad y lo más fundamental como se verá a lo largo del trabajo, la calidad de esa energía: Alumbrado, señalización y elementos circundantes a la carretera; Alimentación de coche eléctrico (durante su movimiento o acumulando en puntos de recarga); Transporte de energía hasta acumuladores; Elementos circundantes en zonas urbanas: Ascensores, escaleras mecánicas, etc.; Alimentación de dispositivos sensores embebidos y autónomos: daños del material, radares, densidad del tráfico, localizaciones GPS, TICs, smart-grids...; Traslación de tecnologías a transporte terrestre por raíles: tren, metro, tranvía, etc.; Desplazamientos de personas o vehículos ligeros en recintos cerrados,...

Piezoelectricidad para captación de energía

Todo vehículo transitando sobre carreteras y firmes semi-rígidos genera deformaciones instantáneas en el pavimento

que actúan de forma negativa en la durabilidad del mismo. En situaciones de tráfico lento, sobre todo en entornos urbanos, la vibración continuada que ejerce el vehículo sobre la carretera supone una cantidad de energía no aprovechada. Si la energía producida por esas deformaciones y vibraciones se pudiese recuperar, contribuiría en gran medida a la conservación de las carreteras, y aún más importante, se podría generar energía eléctrica aprovechando dichas deformaciones que harían de las carreteras infraestructuras no sólo de transporte sino de obtención de energía.

Cuando un vehículo pasa por encima de una carretera, la carretera se deforma verticalmente debido al peso del vehículo. Se genera así una pérdida de energía por parte del vehículo. Una manera de recuperar esta energía sería empleando materiales piezoeléctricos (Curie y Lippmann, 1880-81), los cuales recogerían la energía transmitida por el vehículo al firme y la transformarían en corriente eléctrica (o diferencia de potencial eléctrico).

Una definición clásica de piezoelectricidad (término griego para electricidad a partir de presión) es la generación de polarización eléctrica de un material como respuesta a una tensión mecánica. Cuando el material es sometido a una tensión mecánica aparece una diferencia proporcional de potencial eléctrico entre dos caras del material, produciendo una variación del momento dipolar dentro del material (sin que exista ningún campo eléctrico externo que lo induzca), que da lugar a la aparición de un campo eléctrico en el interior. Este fenómeno se conoce como efecto directo (Lippmann, 1881) o efecto generador y se aplica fundamentalmente en la fabricación de sensores, así como en captación energética, en un estado aún incipiente. El efecto inverso (Curie, 1880) es ampliamente utilizado en actuadores piezoeléctricos para dispositivos electrónicos.

Los materiales piezoeléctricos son cristales naturales o sintéticos que no poseen centro de simetría. El efecto de una compresión o de un cizallamiento consiste en disociar los centros de gravedad de las cargas positivas y de las cargas negativas, apareciendo entonces dipolos elementales en la masa y, por influencia, cargas de signo opuesto en las superficies enfrentadas. La recuperación de energía vibracional por parte de elementos piezoeléctricos incorporados en el asfalto de vías urbanas, estructuras viarias y carreteras puede suponer un hito en el desarrollo de nuevas infraestructuras de transporte y gestión de la movilidad. Sin embargo, los mate-

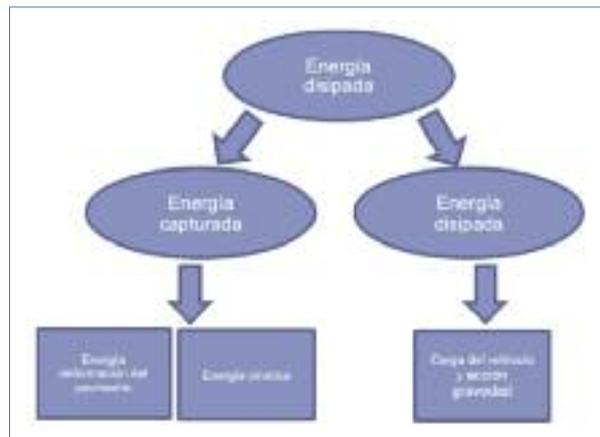


Figura 1: Figura 1. Disipación de energía potencial desde el vehículo.

riales cerámicos piezoeléctricos tienen varias limitaciones, entre ellas: su baja estabilidad mecánica al ser sometidos a tensiones mecánicas; la pérdida de eficiencia por altas pérdidas dieléctricas y procesos de despolarización; la mejor respuesta (mayor entrega de energía) se produce en unos rangos de frecuencias de excitación concretos; y la última pero no menos importante, se trata de compuesto con un contenido mayoritario en plomo, >65% en peso. Sin embargo, los materiales cerámicos piezoeléctricos presentan enormes ventajas como son: su producción a bajo coste en diferentes formas; su facilidad de ajuste de las propiedades mediante modificaciones de la composición de los mismos. El proyecto REC aborda el desarrollo de materiales cerámicos piezoeléctricos encapsulados en estructuras metálicas que permiten soslayar algunas de las limitaciones antes mencionadas y su validación como elementos para el aprovechamiento de la energía vibracional en la carretera.

2. Resultados

2.1 Diseño de los transductores embebidos

En la propuesta de proyecto se fijó como prioritario situar bajo la rodadura un transductor piezoeléctrico tal que no dañara la propia infraestructura, entendiendo como transductor cualquier elemento capaz de transformar la energía desde una forma (mecánica) a otra (eléctrica). Así se valoraron 2 alternativas para dichos transductores: discos y fibras piezoeléctricas. De estas dos se selecciona la opción de discos ya

Captación de energía en la carretera mediante transductores piezoeléctricos

que maximiza la conversión de presión a electricidad presentando un mayor volumen localizado bajo el impacto de un vehículo. Es por ello, que se decide seleccionar esta vía como clave decisiva para el prototipado.

La mejor respuesta piezoeléctrica (mayor entrega de energía) se produce en un rango de frecuencias concreto, el llamado modo fundamental de resonancia del piezoeléctrico. Sin embargo a la frecuencia de impacto de los vehículos nos situamos muy por debajo de esta frecuencia óptima. De acuerdo con un diseño publicado por el Instituto de Cerámica y Vidrio (CSIC) la disposición en discos embebidos puede ser la solución más prometedora para casos de embebido total en una matriz. Por tanto, se opta por incluir en el prototipo estructuras con piezo-cerámicas compuestas con acoplamiento mecánico integrado, para el ajuste de las propiedades requeridas en el contexto de las carreteras: recuperación de energía en un amplio espectro de frecuencias, mejora de la solitud mecánica, reducción de las pérdidas dieléctricas, estabilidad en condiciones de uso e instalación. Existen diferentes métodos para maximizar la conversión de energía mecánica en eléctrica en una cerámica. Los llamados acoplamientos mecánicos son sistemas que hacen transmitir la presión ejercida sobre ellos de forma generalmente direccionada hasta la cerámica. En el proyecto se han puesto en juego acoplamientos mecánicos llamados integrados, llamados así porque constituyen una misma pieza junto con la cerámica. Se trata de címbalos o platillos de metal que pegados en ambas caras de un disco cerámico hacen re-direccionar la fuerza, incluso la difusa, en la dirección de expansión radial del disco, maximizando la eficiencia de la conversión.

El material piezoeléctrico seleccionado para el prototipo es un disco cerámico comercial (de circonato-titanato de plomo (PZT). La temperatura de Curie, definida como la tempe-

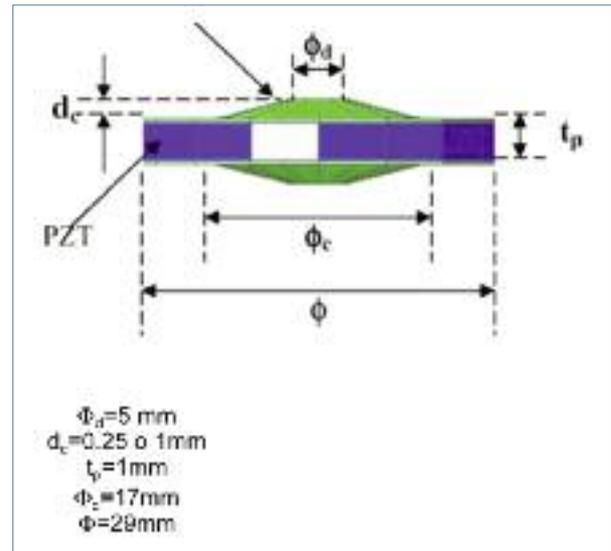


Figura 2. Esquema y dimensiones de los címbalos preparados.

ratura a la cual el material piezoeléctrico pierde sus propiedades piezoeléctricas, fue un factor importante a tener en cuenta en la elección del material piezoeléctrico empleado, dado que la temperatura de procesado de las mezclas bituminosas en las que debía ser integrado el sistema es superior a 150°C habitualmente. Para la cerámica PZT seleccionada la temperatura de Curie se sitúa entorno a los 340°C, garantizando su adecuado comportamiento a las temperaturas de trabajo en carretera.

El diseño de los címbalos se realizó con base en el análisis de la respuesta estructural del sistema címbalo-disco piezoeléctrico mediante aproximación mediante elementos finitos. Finalmente, y aunque el diseño se ha ido modificando durante la etapa de prototipado, se concluye en un diseño de discos de 29mm de diámetro, 1mm de espesor y un címbalo de chapa de latón de 0.3 mm de espesor y 1mm de altura (dc), según el esquema que recoge la Figura 2.

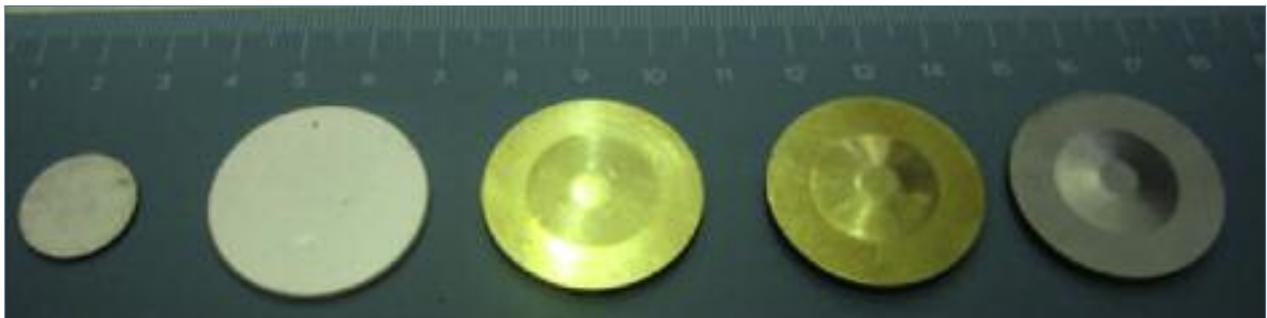


Figura 3. Vista de los diferentes discos y címbalos ensayados en el prototipo Wheel Track.

2.1 Diseño del equipo de ensayo de laboratorio

Tomando el equipo Wheel-Track test, que consiste en una rueda con peso equivalente a vehículo apoyada en un banco con movimiento de vaivén donde se soporta la probeta asfáltica, se ha cableado hacia afuera de la cámara climática hasta un osciloscopio, en primera instancia. Una vez se inicia el ensayo, la rueda pasa rodando encima de la probeta y se puede registrar el pulso eléctrico generado por el piezoeléctrico enterrado bajo la superficie de la probeta. En una segunda fase, se ha sustituido el osciloscopio por una tarjeta de adquisición de datos y un circuito eléctrico, con una presentación en PC de la energía acumulada con el paso continuo de rueda. La rueda de ensayo es metálica y con banda de rodadura de goma maciza de 5 cm de ancho y 2 cm de espesor. La frecuencia de la rodadura es de 42 pasadas por minuto, con un recorrido de 23 cm por sentido. La presión de contacto de la rueda es de 0,9 Mpa.

2.3 Diseño de capas asfálticas para acoger los discos

1. Diseñar un mástico bituminoso (host layer) que contenga el disco piezoeléctrico en su interior.
2. Diseñar la capa que se sitúa bajo la rueda y la capa de rodadura sobre la capa host.

1. Diseño de host layer

La integración de los piezoeléctricos en el asfalto se ha realizado mediante un host layer consistente en un mástico bituminoso compuesto por betún 70/100 y distintos porcentajes de filler silíceo.

Las primeras láminas se realizaron embebiendo los piezoeléctricos en betún y amasando todo el conjunto. Posteriormente el procedimiento consistió en el amasado de la lámina sin piezoeléctricos, colocándose los piezoeléctricos en agujeros realizados una vez enfriado el mástico. Los piezoeléctricos se conectaron a través de cinta adhesiva de cobre con el osciloscopio para las medidas de voltaje. Tras probar varias configuraciones, con la que se obtienen mejores resultados es con aquella donde se colocan tres piezoeléctricos con címbalo en sentido perpendicular al movimiento de la rueda. El porcentaje de filler no llega a

ser determinante, obteniendo resultados similares con porcentajes de filler del 5 al 15%. Tampoco llega a ser determinante el tipo de betún.

2. Diseño de capas de rodadura

Para el prototipo se han desarrollado diferentes capas con el objetivo de simular una capa inferior y una capa de rodadura superior, en medio de las cuales irá colocada la lámina bituminosa con los piezoeléctricos embebidos. Se han estudiado diferentes formulaciones y diferentes espesores de capa.

Para el caso de la capa inferior o base del prototipo la mezcla utilizada ha sido una AC16 con árido silíceo y calizo y betún 35/50 (ver Tabla 1). El espesor seleccionado ha sido 4 cm.

Para el caso de la capa de rodadura superior se han utilizado diferentes formulaciones teniendo en común todas ellas un espesor de 2 cm. Las características de cada una son:

- Capa cerrada con betún 35/50, arena caliza y silíceo
- Capa cerrada con betún 70/100, arena caliza y silíceo
- Capa abierta con betún 35/50, arena caliza y silíceo

El mejor comportamiento lo ofrecen las capas cerradas. Se ha elegido un espesor de capa de 2 cm para que el piezoeléctrico viera reflejada la máxima presión posible, ya que la capa de rodadura puede amortiguar el efecto producido por el paso de la rueda.

Tabla 1. Formulación utilizada para la preparación de las probetas de rodadura inferior.

	Porcentajes			
	12/20	6/12	0/6 sílice	0/6 caliza
22,4-16	5,0			
16-8	10,0	23,0		
8-4		11,0	4,0	2,0
4-2			7,0	8,0
2-0,5			6,0	8,0
0,5-0,063			6,0	4,0
Filler			3,0	3,0
	15,0	34,0	26,0	25,0

2.4 Diseño del circuitaje eléctrico/electrónico

La etapa posterior a la obtención de energía pulsante consta de un circuito rectificador de onda completa con condensador de filtro a la entrada y un condensador de almacenamiento de energía a la salida. El circuito seleccionado conlleva por tanto las etapas de filtrado, de rectificación de señal mediante un puente de diodos, y de estabilización. Dicho circuito necesita un potencial mínimo para funcionar y entregar señal, estimado en 2,5 V de señal mínima. Además, se ha de medir la energía en condiciones de carga resistiva, es decir no en vacío. La figura 4 es una infografía clave en el proyecto, y que podría ser extrapolable a muchos proyectos de captura de energía.

El sistema de medida y adquisición de datos se ha diseñado para la caracterización de las variables eléctricas generadas por piezoeléctricos embebidos en probetas de asfalto. El sistema además permite mostrar y cuantificar la energía acumulada durante la operación del banco de ensayo. La interfaz gráfica permite cuantificar las variables eléctricas tanto en la fase de diseño de probetas como durante las fases de evaluación de producto a largo plazo. Por tanto, ahora con estos valores de energía acumulada, sí es válido calcular los parámetros de potencia, intensidad de corriente y energía generada a cada paso de rueda, y por tanto alimentar las es-

timaciones en condiciones de contorno reales que se han considerado en el presente trabajo. En el prototipo Wheel Track se pueden obtener del orden de 30-50 voltios de señal rms en vacío, equivalentes a unos 4 voltios en condiciones de carga, equivalentes a su vez a 16 W de potencia.

3. Discusión de resultados y estimaciones de energía generada

El valor conseguido en prototipo CTR es de 16 W para cada paso de rueda (vehículo pesado: 0,9 MPa). A partir de aquí, se ha definido un vehículo promedio (85% de vehículo ligero con 0,2 MPa y 15% de vehículo pesado), para el cual se conseguirían, por proporcionalidad de pesos, unos 5,3 W. Este valor de potencia es estable y para una carga capacitiva de 1 MOhm. Para un vehículo promedio con 2,15 ejes y una frecuencia de vehículos de 1000 vehículos/hora (valor obtenido en numerosos tramos de M-30, caso tipo de carretera periurbana de gran capacidad), se puede obtener sobre un solo disco, una energía de 1,5 mWh. El hecho de ser capaces de conseguir valores de microwatios por cada impacto supone un hito en el proyecto y la resolución de una barrera técnica: conseguir excitar el piezoeléctrico en condiciones de restricción de movimiento (embebido en asfalto).

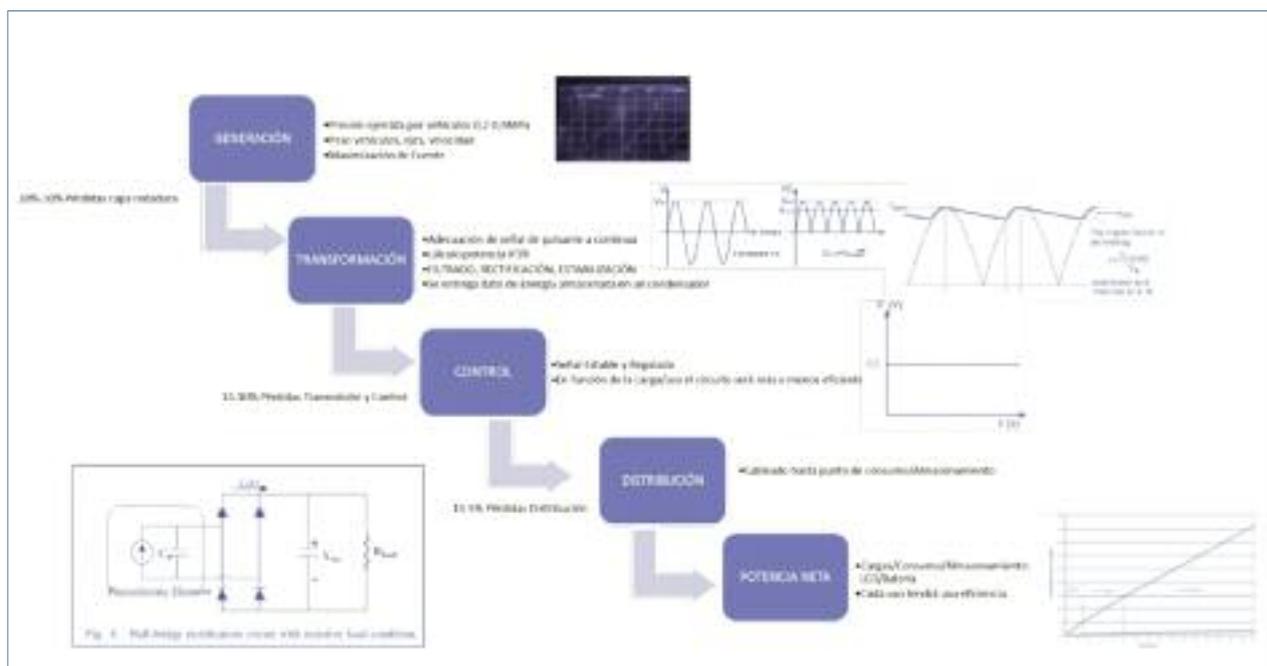


Figura 4. Etapas tradicionales de acondicionamiento y control de señal eléctrica pulsante hasta carga de energía

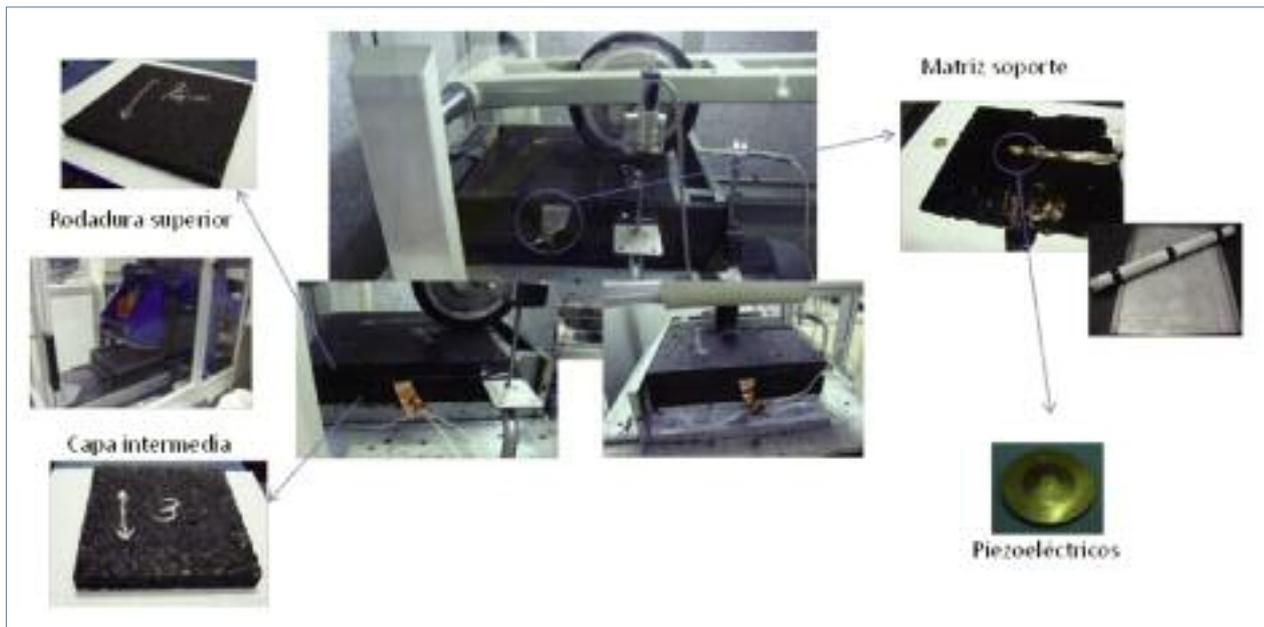


Figura 5. Visión completa del prototipo Wheel Track.

El acercamiento técnico para visualizar la distribución espacial en la carretera, teniendo en cuenta factores constructivos y de mantenimiento de la infraestructura, conducen a la situación de lámina intercapa bajo rodadura (Figura 5). Para facilitar la visualización de las estimaciones se han definido dos unidades de medida:

- Stack: corresponde a una tableta de dimensiones 20cmx10cmx2cm realizada en lámina asfáltica y capaz de albergar 360 discos piezoeléctricos. De forma preliminar, 1 Stack es capaz de generar en estas condiciones unos 4 Wh.
- Rec: a diferencia de la unidad espacial anterior, se define 1 rec como la disposición de discos en stacks, extendidos bajo las zonas de rodadura probable del vehículo, capaz de generar 1 KWh.

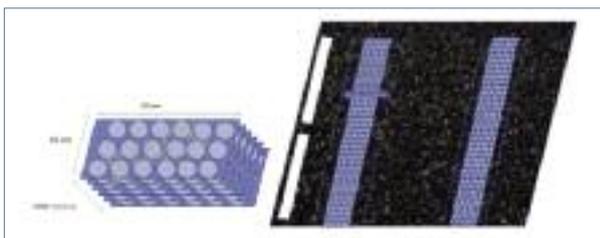


Figura 6. Visualización de agrupación de piezoeléctrico bajo la rodadura.

Se ha ampliado la zona de rodadura probable a 32 cm para cada rueda de vehículo ligero. También se ha tenido en cuenta que la carga difusa también es capaz de generar energía en discos adyacentes a la vertical bajo rueda. Se han admitido pérdidas en la transformación y distribución de la señal eléctrica (no contempladas en prototipo) de un 15%, en cada caso. Con todo, se obtiene que 1 REC debe contener 289 Stacks, que situados en ambas rodaduras de un mismo vehículo, equivaldría espacialmente a unos 12 metros por carril. Para calcular el coste de la instalación de los piezoeléctricos, se han tenido en cuenta el coste de los discos, el ensamblado con címbalos, la integración en lámina asfáltica, la instalación eléctrica (sin baterías) y el mantenimiento eventual de la infraestructura. Se ha lanzado los cálculos teniendo en cuenta que entre 5 y 6 años se suelen hacer trabajos de conservación de las capas de rodadura por daño de la infraestructura. Aunque se pueden preservar de forma localizada los piezoeléctricos ante una operación de mantenimiento o conservación, se prefiere tener en cuenta este valor de 5-6 años, como valor mínimo para rentabilizar la instalación. Así, el coste de la instalación de 1 rec es de 19,4 €. Se obtiene así unos valores correspondientes a 5-6 años para rentabilizar (break even point) la inversión. Teniendo ahora en cuenta que los piezoeléctricos pueden durar en servicio unos 20 años y si logramos conservar su instalación a pesar de las opera-

ciones de conservación, se obtienen unos valores de coste de la energía de 0,11 €/KWh, valores del todo competitivos.

4. Conclusiones

- El proyecto REC ha cubierto las etapas de conceptualización de la idea, establecimiento del roadmap del proyecto, dotación de recursos, lanzamiento y prototipado final. Los datos obtenidos en el prototipo forman una base de decisión para proseguir con los escenarios de uso futuros.
- El prototipo se ha construido en las instalaciones de Repsol y ha sido capaz de demostrar que la tecnología de almacenamiento de energía a partir de pulsos generados por los vehículos es viable.
- La señal pulsante obtenida en cada impacto de rueda ha sido transformada y estabilizada a través de un circuito eléctrico, contra una carga capacitiva que hace las veces de una batería.
- Se detectan dos escenarios de oportunidad para mayor rentabilidad: 1) diseño de producto: lámina de captura para energía de baja intensidad para múltiples escenarios en movilidad, 2) auscultación permanente de carreteras (ligado también al concepto de Smart city), mediante la integración de sensores autónomos wire-less alimentados a través de transductores piezoeléctricos. En ambos modelos, se necesita un socio para acortar tiempos de puesta en mercado. Ambos escenarios supondrán un avance en la innovación en carreteras.

5. Referencias

- Finite element analysis of Cymbal piezoelectric transducers for harvesting energy from asphalt pavement. Hongduo ZHAO,³ Jian YU* and Jianming LING. Journal of the Ceramic Society of Japan 118 [10] 909-915 (2010).
- Effects of Electrically Conductive Additives on Laboratory-Measured Properties of Asphalt Mixtures. Baoshan Huang, Xingwei Chen, and Xiang Shu. J. Mater. Civ. Eng. 21, 612 (2009).
- Patente USRE43044. Electrically conductive pavement mixture.
- Advantages and limitations of cymbals for sensor and actuator applications. P. Ochoa, J.L. Pons, M. Villegas, J.F. Fernandez. Sensors and actuators 132 (2006).
- Energy Harvesting for Structural Health Monitoring Sensor Networks. G. Park, C. R. Farrar, M. D. Todd, W. Hodgkiss, T. Rosing. Los Alamos National laboratory Report LA-14314-MS. February 2007.
- Research on the Electrical Energy of Piezoelectric-embedded Asphalt Mixture. Ning Tang, Changjun Sun, Shaoxu Huang, Pan Pan, Shaopeng Wu. Applied Mechanics and Materials Vols. 303-306 pp 26-31(2013).
- Banco de ensayos para materiales piezoeléctricos en aplicaciones viales. M. Vázquez Rodríguez, F. J. Jiménez Martínez J. de Frutos. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. Vol 50, 2, 65-72, (2011).
- Recent Progress in Piezoelectric Conversion and Energy Harvesting Using Nonlinear Electronic Interfaces and Issues in Small Scale Implementation. Daniel Guyomar, Mickaël Lallart. Micromachines 2, 274-294 (2011).
- Nano-science and -technology for asphalt pavements. M.N. Partl, R. Gubler, M. Hugener. Journal of the AAPT 68, 284 (1999).
- The "cymbal" electromechanical actuator. Aydin Dogan, Jose F. Fernandez, Kenji Uchino, and Robert E. Newnham. IEEE 0-7803-3355-1/96 (1996).

#06

AFIRMACIONES ASFÁLTICAS

“Las mezclas asfálticas pueden reutilizarse indefinidamente con técnicas de reciclado” (EAPA)

#SOSTENIBILIDAD_Y_MEDIO_AMBIENTE

Calendario de eventos

AÑO 2017

30-31 de mayo ASEFMA	XII Jornada Nacional de Asefma	Madrid (España) www.asefma.es
1 de junio EAPA	EAPA Symposium 2017	París (Francia) www.eapa.org
9-12 de junio TRB	International Conference on Transportation Infrastructure and Materials	Quingdao (China) www.trb.org
12-14 de junio EATA	7th EATA Conference	Dübendorf (Suiza) http://eata2017.empa.ch
14-17 de junio TRB	Workshop on Future Highway Capacity manual Updates	Minneapolis, Minnesota (EEUU) www.trb.org
12-16 de junio Politecnico Milano 1863	WCPAM 2017. World Congress on Pavement and Asset Management	Milán (Italia) www.wcpam2017.com
28-30 de junio BCRRA	10th International Conference on Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields	Atenas (Grecia) www.bcrra2017.com
13-16 de agosto AAPA	XVII AAPA International Flexible Conference. "Roads of the Future – Embracing Disruption"	Melbourne (Australia) www.aapa.asn.au/news-and-events/
23-25 de agosto AMAAC	Seminario PIARC-AILA Décimo Congreso Mexicano del Asfalto	Cancún (México) www.amaac.org
Septiembre ACEX	Indicadores de Conservación. Avanzando con la experiencia adquirida	Barcelona (España) www.acex.eu
26-27 de septiembre HDM4	HDM-4 Congress. El punto de encuentro de los gestores de Infraestructura Vial	Santiago (Chile) www.congresohdm4.com
7 de noviembre Plataforma Tecnológica de la Carretera (PTC)	Innovacarretera 2017	Madrid (España) www.ptcarretera.es
27-30 de noviembre CILA	XIX Congreso Iberoamericano del Asfalto	Medellín (Colombia) www.cila2017.com

AÑO 2018

7-11 de enero TRB	TRB 97th Annual Meeting	Washington, DC (EEUU) www.trb.org
11-14 de febrero NAPA	NAPA Annual Meeting	San Diego, California (EEUU) www.asphaltpavement.org
20-23 de febrero AEMA-ISSA-ARRA	AEMA-ARRA-ISSA Annual Meeting	Indian Wells, California (EEUU) www.aema.org
6 de marzo National Center for Asphalt Technology	NCAT Pavement Test Track Conference	Auburn, Alabama (EEUU) www.pavetrack.com
6-8 de marzo World of Asphalt	World of Asphalt Show & Conference	Houston, Texas (EEUU) /www.worldofasphalt.com
26-28 de marzo PPRS	Second world congress on maintenance modernisation, adaptation of road's & streets for tomorrow's mobility	Niza (Francia) www.pprs2018.com



06
2017

**NO invertir
NO es la solución**
Pone en PELIGRO el
DESARROLLO INDUSTRIAL
y la creación de
PUESTOS DE TRABAJO

REFORZANDO el firme, consolidando el FUTURO →

JUNIO 2017

Asociación Española de Fabricantes de Muebles de Madera, S.A. (AEMM)

[/asemba](#) [@asemba_es](#) [/companio/asemba](#)

L	M	X	J	V	S	D
			1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27	28	29	30		



07
2017

La inversión en elementos de
BALIZAMIENTO garantiza
los **DESPLAZAMIENTOS**
SEGUROS de los vehículos

REFORZANDO el firme, consolidando el FUTURO →

JULIO 2017

Asociación Española de Fabricantes de Muebles de Madera, S.A. (AEMM)

[/asemba](#) [@asemba_es](#) [/companio/asemba](#)

L	M	X	J	V	S	D
					1	2
3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23
24 31	25	26	27	28	29	30

Lecturas comentadas:

Informe ‘Road pavement industries highlight huge CO₂ savings offered by maintaining and upgrading roads’

En esta nueva sección, iniciada en el número 18, se van a tratar de analizar algunos textos que, consideramos, pueden tener un interés especial. No se solapa, en absoluto, con la sección inmediatamente anterior, Lecturas recomendadas, que tan sólo pretende informar de la aparición de nuevas publicaciones y en la que el comentario se limita a una reseña de pocas líneas. La extensión del comentario, en esta sección, será de aproximadamente dos páginas.

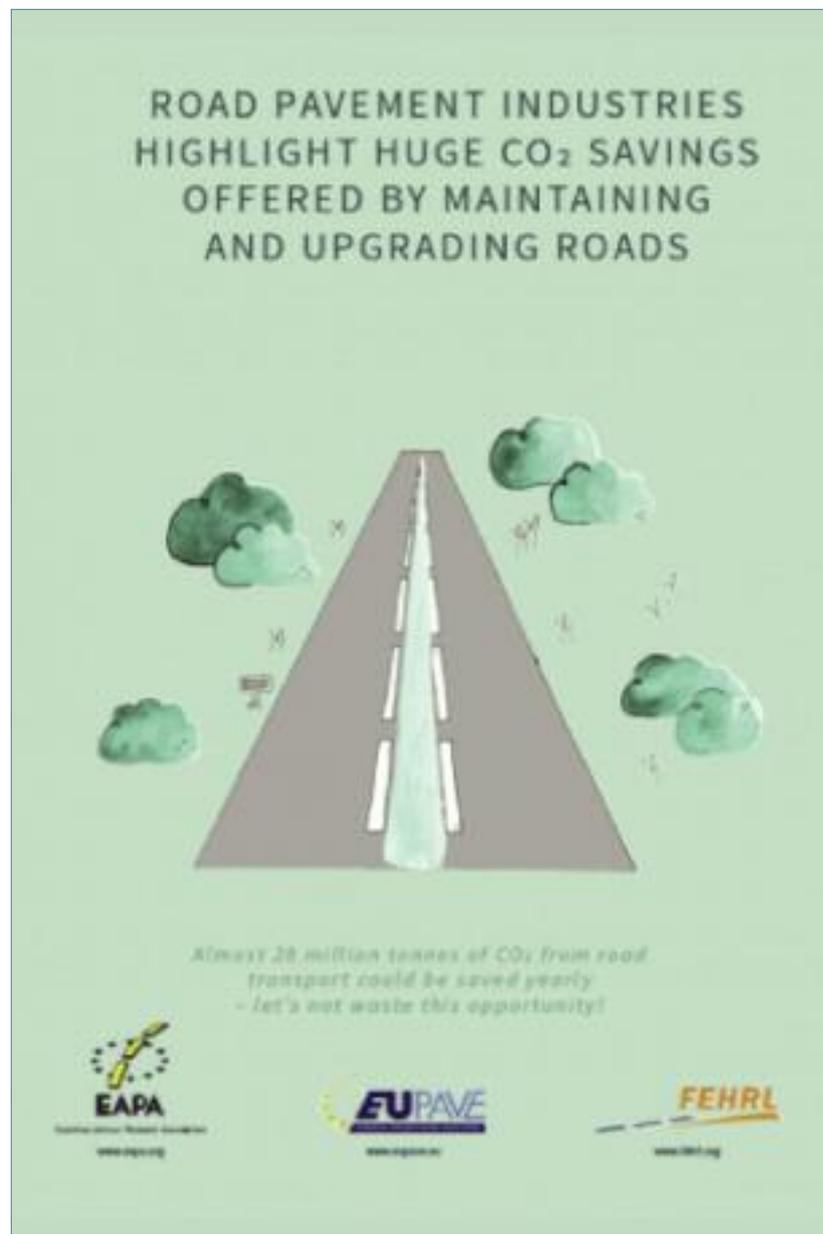
En este número se analizará el documento *“Road pavement industries highlight huge CO₂ savings offered by maintaining and upgrading roads”*, publicado en noviembre de 2016 por EAPA¹, EUPAVE² y FEHRL³.

La participación de EAPA, EUPAVE y FEHRL otorga la máxima independencia y solvencia técnica a las conclusiones y análisis de este importante asunto.

El informe, de cuatro páginas de extensión, aborda de manera muy clara y didáctica las consecuencias que tiene el estado de conservación de los pavimentos, de la red de carreteras europeas, en las emisiones de CO₂.

Las conclusiones del informe son muy contundentes: anualmente pueden ser ahorradas ¡unos 28 millones de toneladas de CO₂!

Más allá de las consecuencias conocidas del estado de conservación



¹ EAPA es la European Asphalt Pavement Association, ver www.eapa.org

² EUPAVE es la European Concrete Paving Association, ver www.eupave.eu

³ FEHRL es la National Road Research Centres in Partnership, ver www.fehrl.org

Informe ‘Road pavement industries highlight huge CO2 savings offered by maintaining and upgrading roads’

de las carreteras en el confort, en el ruido, en la seguridad vial, etc. Este documento se centra en las consecuencias de la regularidad superficial del pavimento sobre el consumo de combustible de los vehículos y por tanto, sobre las emisiones generadas y en particular de CO₂.

Existen hasta la fecha pocos trabajos donde se correlacione la regularidad superficial (IRI) con el consumo de combustible. En el apartado 3, denominado “The numbers”, se aportan varios estudios independientes llevados a cabo, todos ellos referidos en el apartado de referencias bibliográficas. El informe del TRB ⁴ del año 2012 aporta unas correlaciones muy claras. Una segunda referencia proviene del Danish Road Institute ⁵ y, por último, se aporta una tercera referencia de un tramo de ensayo desarrollado en Nevada ⁶ y publicado por la Federal Highway Administration.

A partir de las conclusiones de estos informes y con los datos actuales del estado de conservación de los pavimentos de la red de carreteras de la Unión Europea (UE), se concluye que el ahorro anual posible podría superar los 28 millones de toneladas de CO₂.

Esta cifra representa una oportunidad colosal de reducir, de manera muy significativa, una de las fuentes más impor-

tantes de emisiones de la UE, el transporte por carretera. Basta decir que toda la producción anual de mezclas bituminosas de todos los países de la UE emite una cifra de CO₂ muy inferior al ahorro anual del que estamos hablando.

Este informe se puede descargar en:

- <http://www.eupave.eu/documents/graphics/eupave-ea-pa-fehrl-co2-savings-by-maintaining-and-upgrading-roads.pdf>
- http://www.eapa.org/userfiles/2/Publications/EA-PA%20-%20EUPAVE%20-%20FEHRL%20PAPER_EA-PA_Website.pdf

⁴ National Cooperative Highway Research Programme-Report 720 Estimating the effects on pavement condition on vehicle operating costs, Transport Research Board, 2012, pages 55-56de

⁵ Evolution and harmonization of evenness evaluation techniques. Bjarne Schmidt, Danish Road Institute, Report 94, 1999

⁶ Sime, M., et al., WesTrack Track Roughness, Fuel consumption, and maintenance costs, tech brief published by Federal Highway Administration, Washington DC, Enero 2000

#23

AFIRMACIONES ASFÁLTICAS

“Reciclar RAP es necesario, pero no es suficiente. Debe reutilizarse en mezclas bituminosas” (Editorial número 14)

#SOSTENIBILIDAD_Y_MEDIO_AMBIENTE




PAVEMENT PRESERVATION
& RECYCLING SUMMIT

PPRS

NICE 2018

26-28 MARZO

Nice Acropolis - FRANCIA



Iniciado por :



Apoyado por :



Organizado por :



S
A
V
E
T
H
E
D
A
T
E



PAVEMENT PRESERVATION & RECYCLING SUMMIT

PPRS NICE 2018 - 26-28 MARZO

26-28 MARZO, 2018

Nice Acropolis Convention Center - FRANCIA

Conservación, Modernización y Adaptación de Nuestras Carreteras a la Movilidad del Futuro

@ contact@pprs2018.com
Secretaría de organización

sophie.lopvet@gl-events.com
Expositores y patrocinadores

www.pprs2018.com

 @PPRSummit
#PPRS2018



Innovar está en nuestros genes

En Repsol, la innovación forma parte de nuestra esencia. Por eso, en el Centro de Tecnología Repsol dedicamos todo nuestro esfuerzo a la investigación y desarrollo de asfaltos que hacen nuestras carreteras más seguras, eficientes y sostenibles.



REPSOL

Inventemos el futuro

Más información en repsol.com