

CARRETERAS



Asociación
Española de la
Carretera

4ª EPOCA-NÚM. EXTRAORDINARIO CILA NOV. 2013 - REVISTA TÉCNICA DE LA ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE LA CARRETERA

CILA
2013

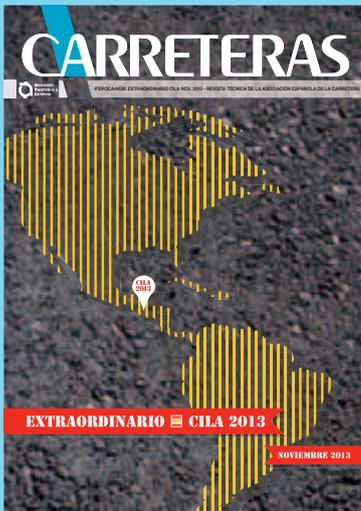
EXTRAORDINARIO  CILA 2013

NOVIEMBRE 2013

Cortesía de / by courtesy of



www.repsol.com



CONSEJO DE REDACCIÓN:

Presidente:

Julio González de Pedroviejo

Vocales:

Dámaso Alegre Marrades
 Mercedes Aviñó Bolinches
 Luis Ayuso Sánchez
 Alberto Bardesi Orúe-Echevarría
 María Dolores Cancela Rey
 Fernando Catalá Moreno
 Carlos Cristóbal Pinto
 Federico Fernández Alonso
 Juan Gallego Medina
 Francisco Gutiérrez Ferrández
 Juan José Jarillo Rodríguez
 Jesús M^o Leal Bermejo
 José Vicente Martínez Sierra
 Pablo Nobell Rodríguez
 Elena de la Peña González
 Vicente Pérez Mena
 Juan José Potti Cuervo
 Sebastián de la Rica Castedo
 Aurelio Ruiz Rubio
 Pablo Sáez Villar
 Gonzalo Sánchez Arias
 Fuencisla Sancho Gómez
 Luis Alberto Solís Villa
 José Antonio Soto Sánchez

PRESIDENTE:

Miguel M^o Muñoz Medina

DIRECTOR:

Jacobo Díaz Pineda

DIRECTORA EJECUTIVA:

Marta Rodrigo Pérez

DIRECTOR TÉCNICO:

Recaredo Romero Amich

REDACTORA JEFE:

Susana Rubio Gutiérrez

REDACCIÓN:

Iván Corzo Reino

DISEÑO Y MAQUETACIÓN:

José María Gil

EDICIÓN Y PUBLICIDAD:

COMUNICACIÓN Y DISEÑO

O'Donnell, 18 - 5^o H
 28009 Madrid
 ☎: +34 91 432 43 18 • Fax: +34 91 432 43 19
 comdis@cydiseno.com
 www.cydiseno.com

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA

DE LA CARRETERA

Goya, 23 - 3^o y 4^o Derecha
 28001 MADRID
 ☎: +34 91 577 99 72 • Fax: +34 91 576 65 22
 aec@aecarretera.com
 www.aecarretera.com

SUSCRIPCIÓN ANUAL (Año 2013):

España: 66 Euros (IVA incluido)
 Europa: 109 Euros • América: 160 \$ / 124 Euros

IMPRIME: Gráficas Marte

Depósito Legal: M- 19.439-1975

ISSN: 0212 - 6389

Las opiniones vertidas en las páginas de Carreteras no coinciden necesariamente con las de la Asociación Española de la Carretera o las del Consejo de Redacción de la publicación.

Presentación

M^a Dolores Cancela Rey
 Alberto Bardesi Orúe-Echevarría **3**

Artículos Técnicos

Balance de los primeros 30 años del CILA. Oportunidades y perspectivas de futuro	Juan José Potti	4
Innovación y desarrollo en las mezclas asfálticas en la Red de Carreteras del Estado	Fco. Javier Payán de Tejada González	12
Ensayo EBADE. Evaluación de la resistencia a la fisuración de las mezclas bituminosas	Félix E. Pérez-Jiménez Ramón Botella / Rodrigo Miró Adriana Martínez	24
Mezclas templadas con emulsión bituminosa	Lucía Miranda Pérez Jacinto Luis García Santiago Nuria Uguet / Daniel Andaluz M ^a del Mar Colás Victoria Francisco José Lucas Santiago Gil	30
Cambios Físicoquímicos en los ligantes empleados en mezclas asfálticas de baja temperatura	Francisco José Barceló Martínez Antonio Páez Dueñas	37
Betunes modificados de baja temperatura. Ejecución de mezcla antifisuras	Baltasar Carlos Rullán Marqués Francisco José Barceló Martínez Emilio Moreno Martínez José Luis Pradas	43
Influencia de las características del betún y los másticos en la determinación de las temperaturas de fabricación y trabajo de las mezclas bituminosas	Andrés Costa Hernández Javier Loma Lozano Emilio Moreno Martínez	47
Reciclado en central en caliente de capas bituminosas	Jesús Felipo Sanjuán	56
Aplicación del ensayo Fénix a la caracterización y evaluación de mezclas bituminosas	Félix E. Pérez Jiménez Gonzalo Valdés Vidal Rodrigo Miró / Adriana Martínez Ramón Botella / José Amorós	66
Estudio de la difusión de rejuvenecedor en betún por espectroscopia de infrarrojos	Verónica Contreras Ibáñez Octavio Lucio Esperilla Antonio Pérez Lepe Luis Carlos Quintero Toscano	76
Estudio del efecto de ceras reductoras de la viscosidad en un betún modificado con caucho	Ana María Rodríguez-Alloza Juan Gallego / Ignacio Pérez	81
Reología de los betunes con caucho	Vicente Pérez Mena M ^a del Mar Colás Victoria	87
Mezclas asfálticas con polvo de caucho NFU: Evaluación acústica en servicio	Santiago Expósito Paje	96
Emulsiones modificadas con polvo de neumático fuera de uso. NFU-Emulsiones	Nuria Querol Sola	125
Reciclado total de mezcla bituminosa. Aplicación, experiencias reales y resultados	Jacinto Luis García Santiago Francisco José Lucas Ochoa Francisco José Barceló Martínez	134
Actuaciones con lechadas bituminosas en capas superiores de pistas de vuelo de aeropuertos	Pablo Raul García Bartolomé Fernando Aguirre Muñoz de Morales	147
Emulsiones bituminosas poliédricas	Nuria Querol Sola	153

Tribunas

El CEDEX, centro de estudios de referencia en el ámbito de carreteras	Mariano Navas Gutiérrez	159
Un nuevo paradigma en la transferencia de tecnología en carreteras	Miguel Ángel del Val Melús	161
Colaboración entre España y Latinoamérica en investigación viaria	Félix Edmundo Pérez Jiménez	163

Recomendaciones presentación artículos

164

El futuro de las carreteras

M^ª Dolores CANCELA REY

Alberto BARDESI ORÚE-ECHEVARRÍA

Coordinadores de la Edición Extraordinaria CILA'2013 de la Revista Carreteras

Todo hace pensar que el futuro del transporte terrestre seguirá siendo responsabilidad de la red de carreteras. O quizás habría que decir que nada nos hace pensar, a día de hoy, que existan alternativas a la carretera como modo de transporte terrestre de personas y mercancías. Para los que "amamos" la carretera, esto es una buena noticia: seguiremos viendo avanzar al sector. Pero, ¿hacia dónde? Difícil respuesta si nos encerramos en los despachos, pero sencilla, casi obvia, si escuchamos a los usuarios. Cinco conceptos básicos que se repiten una y otra vez: durabilidad, seguridad vial, comodidad, medio ambiente y economía. A los que añadiremos otro de carácter interno: la seguridad y salud de los trabajadores del sector.

Hasta hace unos años, la calidad de la carretera era percibida por el usuario en términos de comodidad y seguridad, pero, a medida que se ha ido avanzando en el tiempo, se han ido incorporando nuevos conceptos. En la actualidad podemos afirmar que ya se ha alcanzado un excelente nivel en el binomio comodidad-seguridad y que se está avanzando en agregar también el consumo (más desde el lado de los fabricantes de vehículos, todo hay que decirlo), de tal forma que en el futuro la optimización de la comodidad, la seguridad y el consumo será una exigencia a la vez que un logro de la técnica.

En el campo del diseño estructural y la conservación de los pavimentos, las exigencias estarán encaminadas hacia pavimentos muy duraderos y a intervenciones de rehabilitación cada vez menores para reducir las afecciones al tráfico. Por ello, tenemos que poner el foco en soluciones de pavimentos de larga duración, pavimentos perpetuos si se prefiere, por un lado, y por otro hacia el desarrollo de materiales con propiedades autorreparantes. Porque la capacidad de los pavimentos asfálticos para ser, no sólo reciclados, sino completamente reutilizados es ya una realidad ampliamente extendida. La valoración económica de estas soluciones y el empleo de materiales adecuados hacen que nuestras soluciones resulten cada vez más ventajosas

y compatibles con las nuevas normativas de seguridad y medio ambiente.

En materia medioambiental, se está avanzando a marchas forzadas en diferentes tecnologías que nos permitirán, a corto plazo, generalizar el empleo de mezclas a baja temperatura, con evidentes ventajas respecto a la huella de carbono y a la propia salud de los trabajadores. En el futuro próximo todos los países dictarán normas que exigirán que los residuos de los materiales procedentes de la carretera no sean llevados a vertedero y se reutilicen al 100%. Más aún, la carretera será una excelente alternativa para actuar como vertedero controlado de los residuos de otras actividades ¡Incluso potenciando la calidad! Residuos de neumáticos, de demolición de estructuras, de la siderurgia, de la minería..., son hoy utilizados con éxito.

Por supuesto, la carretera es algo más que los pavimentos. En relación al equipamiento viario, las carreteras serán cada día más inteligentes y dispondrán de nuevos elementos encaminados a mejorar la seguridad, la gestión y la explotación. Pero de esto se ocuparán otros.

Como conclusión, hay que decir que estamos en condiciones de comprometernos a cumplir muchas de las especificaciones que se han planteado para las carreteras del futuro y que la sociedad ya las demanda: carreteras más duraderas con menos actuaciones de rehabilitación, más seguras, más ecológicas y mucho mejor dotadas de información para los usuarios. Sin embargo, por razones derivadas de la gestión de la política económica, que no de la valoración y análisis de los costes reales, en muchos de nuestros países vemos como todo esto no se pone a disposición de los ciudadanos. Ha llegado el momento de la carretera, usada con frecuencia como moneda de cambio en el juego político, el momento en que la carretera comience a ocupar su verdadero lugar en el centro de la tecnología y el conocimiento, como eje vertebrador del territorio y de la economía y como un elemento impulsor del progreso. 

Balance de los primeros 30 años del CILA. Oportunidades y perspectivas de futuro



Juan José POTTI

Presidente Ejecutivo de Asefma
Asociación Española de Fabricantes de Mezclas Asfálticas

RESUMEN

En este número extraordinario de la revista "Carreteras", dedicado al próximo, XVII CILA de Guatemala, he querido hacer balance de su actividad y repercusión. Lo escribo en primera persona porque quiero que mis palabras se entiendan como una opinión personal.

Hace más de 30 años que se desarrolló el primer congreso CILA en Argentina. Esta iniciativa surgió de dos personas admirables y entrañables, pero muy distintas. Me refiero al ingeniero brasileño Helio Farah y al recientemente fallecido, licenciado argentino Jorge Agnusdei, del que haré una glosa al final del texto.

Ya se han realizado 16 congresos y se han acumulado más de 2.000 ponencias publicadas. Es un enorme patrimonio tecnológico. El espíritu del CILA, la idea original, goza de excelente salud como lo demuestra, su impecable trayectoria, el número de asistentes o el número de ponencias presentadas en cada edición.

En esta texto he querido realizar y ampliar una serie de ideas que lancé en la ponencia de la última jornada de Rio de Janeiro, hace casi dos años, con motivo del XVI Congreso CILA. Esas ideas, por coherencia, me las apliqué a mi mismo y este es el resultado.

Palabras clave: *Congresos, CILA, Asfalto, Pavimentación.*

HACE MÁS DE 30 AÑOS SE CELEBRÓ EL PRIMER CONGRESO CILA

En el XVI Congreso CILA celebrado en Río de Janeiro, hace casi dos años, tuve ocasión de hablar, en la sesión plenaria de la última jornada. El título de la charla era “Panorámica de las novedades en la pavimentación asfáltica”.

A lo largo de mi presentación abordé una serie de cuestiones relativas a las últimas novedades dentro de la pavimentación, como me habían solicitado, pero me pareció que era una ocasión excelente para reflexionar en torno al papel del CILA en nuestra actividad.

En mi opinión, el espíritu del CILA está plenamente vigente, como el del primer CILA, que se celebró hace más de 30 años, en el año 1981. Se ha consolidado como el más importante Congreso internacional, de habla hispana y portuguesa, de pavimentación a nivel mundial. La cantidad y la calidad de los trabajos que se presentaron al CILA de Río de Janeiro demuestran que además goza de una excelente salud.

No es nada fácil mantener el mismo espíritu después de más de 30 años. Han cambiado mucho las condiciones y las exigencias de nuestra sociedad en estos 30 años. Veamos una serie de ejemplos cotidianos: la música se comercializaba en enormes discos negros de vinilo, el teléfono era un aparatoso artilugio fijo que nada tiene que ver con nuestros actuales dispositivos móviles tipo smartphone y el correo era sinónimo de sello y sobre.

Desde el punto de vista de la comunicación, en el año 1981 se acababa de introducir el telefax o fax, como sistema de transmisión, no había internet, ni correo electrónico, no existían ordenadores personales y las redes eran para pescar. Esta última frase que puede parecer sacada de contexto, cobrará sentido un poco más adelante.

ANÁLISIS DEL ESPÍRITU DEL CILA Y OPORTUNIDAD DE ACTUALIZACIÓN

El CILA surgió a partir de la idea de dos personas admirables, pero muy distintas. Me refiero al ingeniero brasileño Helio Farah y al recientemente fallecido, licenciado argentino Jorge Agnusdei. En el año 1981 hicieron un congreso latinoamericano del asfalto en el que técnicos de diversos países de habla hispana y portuguesa tuvieron la oportunidad de poder hablar, durante unos días, sobre pavimentación.



La idea original ha ido creciendo a lo largo de estos treinta años, quince congresos CILA, pero creo que ha llegado el momento de actualizar esa idea.

En esa charla que realice en Río de Janeiro realicé una serie de propuestas concretas, a las que denominé propuestas CILA 2.0, que quiero desglosar aquí:

- Proponía hacer una página web CILA
- Proponía que la web esté integrada en las redes sociales (twitter, LinkedIn)
- Proponía crear un Grupo de Trabajo CILA virtual
- Proponía crear trabajos de I+D entre los países CILA



- Proponía crear una red de Asociaciones del CILA y desarrollar estas ideas ASAP

Alguna de estas propuestas ya ha sido desarrolladas, muy recientemente. Concretamente las dos primeras.

En la actualidad, ya existe una página web denominada: www.congresocila.org

Esta página web permite el acceso a dos redes sociales: Twitter y Facebook. En Twitter hay un enlace a @congreso-cila y en Facebook se ha creado una página en: www.facebook.com/CongresoIberoLatinoamericanoDelAsfalto

Desgraciadamente, a día de hoy, no hay novedades respecto a las tres últimas propuestas. Hablaré de ellas, a continuación.

PATRIMONIO TÉCNICO DE LOS CONGRESOS CILA

Afortunadamente, la capacidad de comunicación actual es muy superior a la del año 1981. Más allá de lo evidente, la aparición de internet y las posibilidades del correo electrónico, han permitido una comunicación más sencilla y fluida entre los delegados del CILA pero me atrevo a decir que, en general, el desarrollo de los congresos CILA siguen siendo muy parecidos a los de aquel primer Congreso del año 1981.

Esta no es una característica exclusiva del Congreso CILA. En general, todos los congresos técnicos siguen siendo bastante analógicos. Se realiza un enorme esfuerzo para elaborar un programa técnico atractivo y poder atraer a los conferenciantes y un buen número de asistentes pero una vez concluido el congreso, la mayor parte de ese esfuerzo se desvanece o queda simplemente en el recuerdo junto al libro del congreso.

El Congreso CILA de Río de Janeiro convocó a más de 600 técnicos de más de 20 países. Durante los 5 días que duró el congreso se presentaron más de 200 ponencias. Todo un éxito. En nuestra memoria quedarán grandes conferencias, presentaciones brillantes y momentos muy entrañables, además de los tres volúmenes del congreso de 2.236 páginas, magníficamente encuadernados.

Son ya, 16 congresos CILA. En cada uno de los anteriores congresos CILA se ha hecho siempre lo mismo,



se han recogido todas las ponencias en los libros del congreso. A título de ejemplo, en el XV Congreso CILA, que se celebró en Lisboa, se recogieron todas las ponencias en dos volúmenes, en total 1.650 páginas.

Es enorme el patrimonio técnico acumulado. Se podría estimar en más de 30 libros, lo que componen más de 9.000 páginas y más de 2.000 ponencias.

Es evidente que no todo lo que ha sido publicado sigue siendo vigente pero ahí encontramos una de las primeras dificultades. ¿Podemos buscar en alguna base de datos todas las publicaciones que se han realizado CILA? ¿Podemos encontrar un listado autores del CILA?

La respuesta no es fácil de localizar. La única entidad, que yo sepa, que ha intentado sistematizar las publicaciones del CILA ha sido la Comisión Permanente del Asfalto de Argentina. En una pestaña de su página web, www.cpasfalto.org se aborda la actividad del CILA y ofrece la posibilidad de descarga del listado de todos los trabajos presentados a los CILA, en formato excel.

EDICIÓN DEL CILA	PONENCIAS RECOGIDAS	PAÍS DE CELEBRACIÓN
I	25	Argentina
II	50	Brasil
III	66	
IV	57	
V	68	
VI	75	
VII	60	
VIII	91	
IX	133	
X	231	España
XI	169	
XII	115	
XIII	229	Costa Rica
XIV	284	Cuba
XV	193	Portugal
XVI	211	Brasil
TOTAL	2.057	

Tabla 1. Ediciones del CILA y ponencias

De este listado se puede confirmar que el número de trabajos presentados a cada edición del CILA ha sido el que se recoge en la Tabla 1.

El número de ponencias registradas en las primeras ediciones del CILA era muy inferior a la de las últimas ediciones. En las cinco primeras ediciones del CILA la cifra de ponencias presentadas oscilaba entre 25 y 68, cifras de la primera y de la quinta edición, respectivamente. En las cuatro últimas ediciones las ponencias recogidas oscilan entre 193 y 284, de las ediciones quince y catorce, respectivamente.

Estamos hablando, por tanto, de un congreso que acumula ya 16 ediciones, más de 30 años de historia y más de 2.000 ponencias publicadas. Argumentos que lo confirman como el congreso en habla hispana y portuguesa más importante, a nivel mundial, de pavimentación de carreteras.

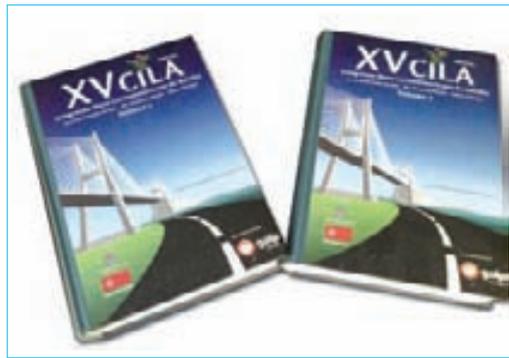
IMPACTO Y GESTIÓN DEL CONOCIMIENTO DEL CILA

Asumido el hecho de la importancia del CILA en términos de impacto técnico y dada la secuencia, sin interrupciones, de las 16 ediciones ya realizadas, podemos afirmar que se trata de un congreso muy consolidado.

Es evidente que en las primeras ediciones del CILA, el desafío era darle continuidad a este proyecto. Los medios técnicos de la época era muy inferiores a los que ahora poseemos pero, en mi opinión, ha llegado el momento de aprovechar las posibilidades tecnológicas que ahora disfrutamos y obtener el máximo beneficio del patrimonio técnico CILA acumulado. Desde este punto de vista, parece poco coherente realizar un enorme esfuerzo de convocatoria cada dos años, acumular más 200 ponencias, 600 asistentes y sin embargo, no poseer un sistema que permita un acceso fácil a cada una de esas ponencias.

La tercera propuesta que ya realizaba en Río de Janeiro era la creación de un grupo CILA virtual. Trataré de explicarlo ahora con más detalle.

En mi opinión, uno de los cambios más reseñables de estos últimos 30 años es la facilidad de acceso a información. Hace 30 años, como decía en la introducción, nuestros sistemas de intercambio de información se basaban en el sobre y en el sello. El libro era el elemento imprescindible que componía el patrimonio tecnológico de la biblioteca. Recordemos que no existía ordenador



personal. Todo era off-line. Era una difusión tecnológica puramente analógica.

Pero ahora, 30 años más tarde, ¿debemos seguir haciendo lo mismo, publicar un libro o varios libros cada vez que celebramos

un CILA? No digo que dejemos de publicarlos pero hay otro dato muy claro, hemos pasado de 25 ponencias a 211 y eso implica no un libro, sino tres, y mucho peso en papel. No voy a invocar aquí criterios medio ambientales en torno al consumo de papel, ni argumentos para proteger los bosques, simplemente voy a tratar de reflexionar en torno a una mejor gestión del conocimiento.

Cada dos años nos vemos durante cinco días, no menos de 500 técnicos, de más de 20 países para escuchar y argumentar novedades sobre la pavimentación asfáltica. Siendo importante, importantísimo, ese evento, creo que es sólo una mínima parte del impacto que podría tener cada CILA.

Propongo que se realice una difusión individualizada, en formato pdf, de todas y cada una de las ponencias que componen el libro de cada congreso. Cada uno de estos archivos pdf podría estar depositado en una plataforma de descarga alojada en una página web que permitiría buscar y localizar de manera individual cada uno de los archivos o ponencias. Estoy convencido que para todos los que asistimos al congreso sería luego mucho más sencillo no sólo realizar la búsqueda de la información sino facilitar la difusión a nuestros colaboradores.

Esto permitiría además que alumnos de escuelas universitarias o facultades y técnicos de empresas y administraciones que no han podido ir al congreso pudieran acceder fácilmente a las ponencias del congreso y utilizarlas como base o referencias bibliográficas para futuros desarrollos técnicos.

En este sentido, me permito destacar una página web, que venimos empleando en Asefma para este mismo cometido y que nos está dando un excelente resultado. Se trata de la plataforma itafec, www.itapec.com

Desde esta plataforma, no sólo se puede descargar, en la pestaña "TIENDA", los archivos disponibles sino que además de descargar los archivos de texto, vídeo, imágenes o presentaciones, se abre una comunicación directa con el autor que permite establecer una relación directa y aprovechar mejor los archivos descargados.

Creo que esta idea, la descarga individualizada de archivos en formato pdf, sería la base para una mejor gestión

del conocimiento que se genera en cada congreso. La interacción con el autor, bajo ese concepto autor 2.0, permitiría además hacer progresar más fácilmente en las líneas de trabajo más interesantes y crear el germen de posteriores actividades de investigación y desarrollo.

LA PREPARACIÓN DEL CONGRESO, DIFUSIÓN DEL PROGRAMA

Hace unos días, a mediados de agosto, recibí por mail de la cámara de Guatemala, el último boletín de promoción del XVII Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto (CILA Guatemala 2013), que se realizará en el mes de noviembre en la ciudad de Antigua Guatemala.

En ese mail, nos pedían a los delegados de los países que tienen representación en el CILA, la colaboración para publicar este boletín a través de las revistas técnicas de cada país.

Yo creo, que además de estos medios de difusión convencionales o analógicos, existen en la actualidad herramientas mucho más útiles para la difusión de la información. Me refiero a las acciones propias de un gabinete de comunicación 2.0. Trataré de explicar esta denominación.

Primero apareció el gabinete de comunicación 1.0, el uso de internet empezaba a generalizarse en las agencias de relaciones públicas y departamentos de comunicación y daba comienzo la era online 1.0. En esos tiempos, de los que no hace tanto, apenas 10 años, Google empezaba a mandar, la difusión de contenidos comenzaba a realizarse a través de e-mail y nacían las primeras salas de prensa online, totalmente unidireccionales, escasas de contenidos y difíciles de gestionar.

En la actualidad, se habla de gabinetes de comunicación 2.0, porque la democratización del acceso a Internet, el uso masivo de las redes sociales y las posibilidades de las herramientas 2.0 son ahora los caballos de batalla. Esta nueva forma de relacionarnos, abre las puertas a un nuevo universo, apasionante y lleno de oportunidades, pero que también supone un reto para las empresas e instituciones, que se ven obligadas a dar un giro a sus políticas de comunicación, asumiendo que ahora sólo existe un camino: el diálogo y el intercambio de información bidireccional.

Cada red social cubre una necesidad y tiene una orientación específica, en este sentido, el gráfico de John Atkinson que aparece en este texto me parece muy significativo. Desde hace unos pocos años, hablar de redes ya no es sinónimo de pesca sino de actividades 2.0



Los beneficios son numerosos. El diseño de un plan de comunicación basado en el uso de tres redes sociales, en nuestra experiencia: Twitter, Facebook y Linked in, son las más adecuadas, permite que, más allá de la comunicación a través de impresos y boletines, y gracias a las redes sociales se pueda llegar mucho más lejos y a mucha más gente. Además, gracias a las redes sociales podemos llegar con mayor facilidad a la gente más joven.

Es un hecho conocido que mientras hace treinta años nos comunicábamos con sello y sobre, hoy el correo es sinónimo de correo electrónico, para la gente de más de 35 años, pero los jóvenes se comunican a través de las redes sociales.

La difusión del evento y la captación de asistentes a través de las redes sociales sólo será eficaz si hay una actividad importante y los contenidos son adecuados. Para ello es precisa una buena planificación en cada una de las redes sociales seleccionadas.

LA EMISIÓN EN STREAMING DE LOS CONGRESOS

La charla que dí en el XVI Congreso CILA celebrado en Río de Janeiro, en la sesión plenaria de la última jornada, "Panorámica de las novedades en la pavimentación asfáltica", me obligó a aplicar mis propias recetas.

Unos meses más tarde, en febrero del año 2012, y con motivo de una jornada sobre ensayos en mezclas bituminosas que organizaba Asefma, intentamos, por primera vez, realizar la emisión de una jornada en streaming o con visualización online a través del ordenador, tablet o smartphone.

El esfuerzo fue muy importante pero los resultados fueron espectaculares. Tuvimos más asistentes en online que presenciales.

Desde entonces, en todas las Jornadas y Congresos de Asefma, ofrecemos, además de la inscripción standard o presencial, la inscripción online con 2 o 3 cámaras HD. Haciendo una buena campaña previa de difusión del evento, apoyada en las redes sociales, los costes extras para acometer la emisión en streaming se compensan con los ingresos extras obtenidos por las inscripciones



para visualizarlo online. Los precios de venta de la inscripción online suelen ser un 30% del coste de inscripción presencial.

La emisión online debe complementarse siempre con un plan de comunicación apoyado en las redes sociales, además de la publicación a través de periódicos, revistas, y páginas web.

Es una nueva forma de comunicar, a través de nuestros mail o de nuestros contactos podemos llegar a mucha gente pero a través de las redes sociales podemos llegar a muchísimos más. A decenas de miles de contactos. Es gente más joven y también llegamos a los medios de comunicación con lo que reforzamos el impacto del evento. Esta tarea facilita mucho las inscripciones online y las inscripciones presenciales o estándar.

Es muy conveniente generar un hashtag de la Jornada para poder seguir los comentarios y sugerencias en directo, a través de Twitter. Estos comentarios están integrados en la emisión streaming de modo que, se visualizan en directo, junto con la imagen.

A título de ejemplo, en la VIII Jornada Técnica Nacional de Asefma se contó con la presencia de más de 300 asistentes presenciales y más de 100 inscripciones online de varios países (Argentina, Méjico, Chile, Costa Rica, Estados Unidos, Canadá, etc.).

La Jornada fue seguida en directo por Twitter en el hashtag: #VIIIJornadaAsefma. Se recogieron más de 550 tuits, durante la jornada, desde 53 usuarios diferentes con un alcance de 75.946 personas y un impacto de 211.471 impresiones, lo que constituye un récord absoluto.

Un alcance de más de 75.000 personas y un impacto superior a las 210.000 impresiones, en una Jornada de 300 asistentes !!

Hablo desde el convencimiento personal pero también con la humildad suficiente para que en ningún caso se entiendan mis palabras como una crítica a lo ya realizado sino como una oportunidad de avanzar y difundir mucho más, gracias a las nuevas tecnologías.

CONCLUSIONES

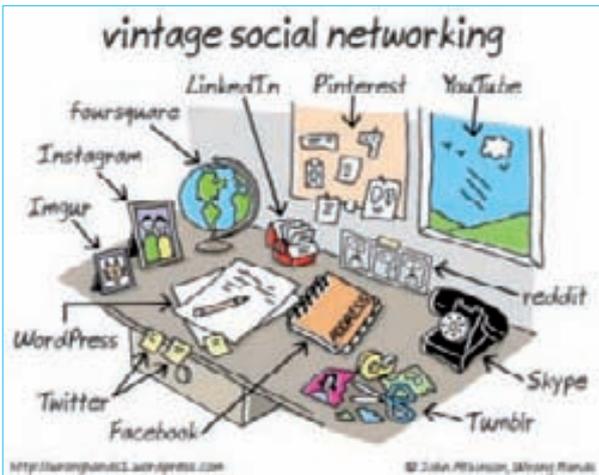
En este artículo he querido hacer balance de la actividad y repercusión del congreso CILA. Lo escribo en primera persona porque quiero que mis palabras se entiendan como una opinión personal.

Ya se han realizado 16 congresos y se han acumulado más de 2.000 ponencias publicadas. Es un enorme patrimonio tecnológico. El espíritu del CILA, la idea original, goza de excelente salud como lo demuestra, su impecable trayectoria, el número de asistentes o el número de ponencias presentadas en cada edición.

En este texto he querido dar cuenta y ampliar una serie de ideas que lancé en la ponencia de la última jornada de Rio de Janeiro, hace casi dos años, con motivo del XVI Congreso CILA. Esas ideas, por coherencia, me las apliqué a mi mismo y este es el resultado.

En mi opinión el paso a la digitalización o a la aplicación de las tecnologías 2.0 en los congresos técnicos no es una ficción, ya es una realidad que ha permitido crear un impacto muy superior. He dado cifras concretas. Además, combinándolo con la emisión en streaming se deja constancia digital, para siempre, y lo que es más importante, permite a mucha gente que no ha podido acudir ese día, a ese evento poder visualizar las intervenciones realizadas con total nitidez, cuantas veces quieran.

Me atrevo a decir que del mismo modo que se decía "lo que no sale en televisión no existe", frase que siempre me ha parecido un exceso pero que hay que entenderla en términos de impacto social. Con mucha más razón yo digo "lo que no queda digitalizado llega menos y se localiza peor".



Estoy convencido, y es la experiencia personal que he tratado de exponer, que es necesario dar el paso hay un XVII Congreso CILA 2.0

No quisiera terminar este texto sin un recuerdo muy sentido hacia nuestro querido Jorge Agnusdei.

RECONOCIMIENTO PÓSTUMO A JORGE AGNUSDEI

Jorge Agnusdei murió el 8 de octubre de 2.012 en Buenos Aires. Tenía 76 años y muchos más amigos que años. En esta breve nota voy a tratar de hablar del perfil humano de Jorge y de su trabajo en el sector de las mezclas bituminosas, de su legado.

En el último CILA de Río de Janeiro, en noviembre de 2011, un poco antes de la clausura se le rindió un sincero reconocimiento.

Tuve la impresión de que fue tan entrañable como improvisado. Recuerdo en especial las brillantes palabras del ingeniero Tosticarelli, en las que, además de mostrarnos unas fotos de Jorge Agnusdei muy joven, cuando ambos eran estudiantes en el Imperial College, nos confesó una serie de anécdotas. Consiguió arrancar las sonrisas y hasta las carcajadas cuando nos contó que Jorge le ayudó económicamente a mantener su coche en esa época: "...Yo a cambio le llevaba donde me pedía, cómo negarme. La verdad es que, sin ser plenamente consciente, yo durante esa época fui su gigoló!"

Jorge era un hombre generoso y apacible. Desprendía bondad. No me extraña nada que ya en su juventud tratara de ayudar a nuestro amigo Tosticarelli y de ahí se ganara su amistad, porque ese era su modo de ser. Te ganaba por su generosidad.

Yo le conocí gracias a Juan Antonio Fernández del Campo. Juan Antonio era el director general de Probisa y en esa empresa trabajé durante más de 20 años. Le



acompañé a un CILA, posiblemente fue el de Punta del Este, en el año 1987.

Era enorme la amistad que unía a Jorge con Juan Antonio, además del mutuo reconocimiento profesional. Seguro que esas razones fueron las precisas para que Jorge aceptase el cargo de miembro del Jurado para el premio Juan Antonio Fernández del Campo. En esta IV edición, Jorge no pudo asistir a la reunión para la selección del trabajo premiado. Su salud venía siendo delicada desde hace unos meses.

Los CILA son, posiblemente, el legado más claro, más evidente, de la tarea de Jorge y de su inseparable Helio Farah. Los Congresos Íbero Latinoamericanos del Asfalto han sido, edición tras edición, la constatación de una iniciativa pionera en sus inicios, pero que, gracias a los esfuerzos de integración de Jorge y Helio, se han consolidado como la gran manifestación técnica de habla hispana y portuguesa de nuestro sector.

En Argentina, durante la XXXVII Reunión del Asfalto, dedicada al desaparecido Félix Lilli, antes de mi intervención, Felipe Nougues hizo una sentida glosa de la figura de Jorge Agnusdei y nos pidió a todos los asistentes la máxima implicación para que el próximo CILA, en Antigua (Guatemala), noviembre 2013 sea lo que Jorge hubiera deseado. Felipe estuvo unos días antes en Guatemala acompañando a Helio, sustituyendo a Jorge, en esa abnegada tarea de preparación. Allí supo de la muerte de Jorge y Felipe fue quien nos transmitió telefónicamente la fatal noticia.

Jorge le pidió a Helio que Felipe le sustituyera en sus tareas del CILA y, el día 20 de noviembre, Felipe Nougues fue nombrado oficialmente, por los delegados nacionales de los más de 25 países implicados, nuevo secretario permanente del CILA, junto a Helio Farah.

Jorge nos dejó mucho más que un importantísimo congreso. Nos dejó a los que tuvimos la suerte de conocerlo un modo de hacer las cosas basadas en la bondad, en la generosidad y en el liderazgo apacible. ¡Descansa en paz! 

LOW WARM MIX

PAVIMENTO PARA CARRETERAS VERDES

Nueva y revolucionaria mezcla templada con emulsión asfáltica de alta calidad para capas de base y refuerzo

Temperatura

Low Warm Mix se extiende a 70°C, frente a los 160°C de las mezclas tradicionales y los 120°C de las templadas comunes.

Fabricación

En plantas convencionales mediante una fácil adaptación y a un coste reducido.

Economía

Ahorra costes de energía al requerir una temperatura baja.

Componentes

Áridos de granulometría gruesa y emulsión asfáltica con aditivos especiales.

Resistencia y durabilidad

Cumple las especificaciones más exigentes.

Ecología

Respeto el medio ambiente al reducirse drásticamente la quema de combustible y la emisión de gases contaminantes.



Capitán Haya, 1 planta 15 - 28020 Madrid (España)
Tel: +34 653 90 51 44
info@cprtheefficientway.com
www.cprtheefficientway.com

Innovación y desarrollo en las mezclas asfálticas en la Red de Carreteras del Estado



Fco. Javier PAYÁN DE TEJADA GONZÁLEZ

*Jefe del Servicio de Conservación y Explotación de Carreteras de Valladolid
Demarcación de Carreteras del Estado
en Castilla y León Occidental
Valladolid*

RESUMEN

Los últimos años han sido pródigos en el desarrollo de nuevos materiales y tecnologías en el campo de las mezclas bituminosas y los firmes. Estos desarrollos han ido enfocados fundamentalmente a la obtención de carreteras más sostenibles, mediante el aprovechamiento y la valorización de residuos, la reducción en la emisión de gases de efecto invernadero o el ahorro de recursos naturales no renovables. Con objeto de incluir estas tecnologías en la normativa y en la práctica habitual de construcción de firmes, la Dirección General de Carreteras del Estado ha promovido la realización de tramos experimentales a escala real en los que poder comprobar su eficacia y las dificultades de su formulación y puesta en obra. En este artículo se presentan los tramos experimentales más significativos promovidos en los últimos años junto a una breve descripción de los resultados obtenidos.

Palabras clave: Mezcla bituminosa, desarrollo sostenible, reciclado de firmes, mezclas semicalientes, mezclas templadas

INTRODUCCIÓN

Los últimos 20 años han sido pródigos en el desarrollo de nuevos tipos de ligantes y mezclas bituminosas. Los años noventa y la primera decena del siglo XXI han deparado una explosión de nuevos productos y técnicas que tienen como objetivo básico colaborar con el desarrollo sostenible, aparte de proporcionar a la carretera las necesarias condiciones de seguridad, confort y durabilidad. En efecto, desde la creación del Club de Roma en 1968 y la celebración de la Conferencia sobre *Medio Humano de las Naciones Unidas* (primera "Cumbre de la Tierra") celebrada en 1972 en Estocolmo, y muy especialmente desde la celebración de la Conferencia de la ONU sobre Medio Ambiente y Desarrollo (Segunda "Cumbre de la Tierra") 25 en Río de Janeiro en 1992, la preocupación por el desarrollo sostenible y los temas medioambientales ha ido creciendo a nivel mundial y afectando a todos los sectores productivos, y la carretera evidentemente no podía quedarse atrás.

Así, la mayor parte de los desarrollos habidos en materiales, mezclas y equipos han ido destinados a un mejor aprovechamiento y a la reducción del consumo de recursos naturales (prevención), a la reutilización de materiales ya empleados en las carreteras (reutilización), al reciclado y valorización de residuos (reciclado), y a la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero, cumpliéndose de esta manera con los principios básicos de la directiva europea sobre residuos 2008/98/CE.

La Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento ha impulsado desde el primer momento la innovación y facilitado la implantación de los nuevos desarrollos, colaborando en la realización de las pruebas necesarias para la comprobación de su comportamiento a escala real y promoviendo la realización de tramos experimentales. Como conclusión de las investigaciones y pruebas experimentales realizadas, la Dirección General de Carreteras ha elaborado la normativa correspondiente que supone el espaldarazo definitivo a las técnicas propuestas.

Las tecnologías contempladas en este contexto se pueden dividir en tres grandes bloques: Las técnicas de reciclado en toda su diversidad, en frío o en caliente. Las técnicas para incorporación de polvo de caucho procedente de neumáticos fuera de uso, residuo importante por su volumen que se puede aprovechar con ventaja en las mezclas asfálticas. Y, por último, las técnicas para fabricación de

mezclas bituminosas a bajas temperaturas, ya sean semicalientes o templadas.

De todas ellas, y de las experiencias tenidas en la Red de Carreteras del Estado voy a hablar a continuación.

MEZCLAS CON POLVO DE CAUCHO PROCEDENTE DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO (NFU)

En España se producen 300.000 t al año de residuos procedentes de neumáticos fuera de uso. Este volumen de residuos supone un grave problema medioambiental por el espacio que ocupan y por la contaminación de suelos que originan. Por otra parte, el vertido de neumáticos está prohibido en España, incluso troceados, desde el 1 de enero de 2006.

Sin embargo, el neumático está constituido por materiales que, en su mayor parte, pueden reciclarse. Así, es conocido desde hace tiempo que el caucho puede incorporarse al betún como un modificador que mejora sus características. La idea de la incorporación del caucho a las mezclas bituminosas se remonta a finales del siglo XIX, se retoma en los años sesenta del siglo XX buscando un modificador de ligante que mejore sus propiedades reológicas y vuelve a surgir con fuerza a partir de los años ochenta como consecuencia del problema de los residuos generados por el vertido de los neumáticos.

La mezcla de polvo de NFU muy fino con el betún a alta temperatura produce un reblandecimiento de las partículas que absorben los componentes más ligeros del betún y se hinchan. Al hincharse las partículas, se produce un aumento de la viscosidad del ligante y se reduce su penetración. Este proceso se suele denomi-



Figura 1. Equipo de fabricación in situ de betún con caucho.

nar digestión. Este proceso se ve favorecido por las mayores temperaturas y el menor tamaño del polvo. Al final del proceso quedan en la masa del ligante partículas totalmente o casi totalmente digeridas, que son las que producen a modificación del betún y otras partículas en su estado original que proporcionan una cierta elasticidad y aumentan la viscosidad al actuar como si fueran un polvo mineral. En función de las características que se busquen en el ligante puede interesar potenciar uno u otro efecto.

Actualmente hay dos grandes métodos de aplicación del caucho en mezclas asfálticas:

- La vía húmeda
- La vía seca

La vía húmeda consiste en la fabricación de un ligante bituminoso mediante la mezcla de un betún con el polvo de caucho a alta temperatura previamente a su introducción en el mezclador de la planta de fabricación de la mezcla bituminosa en caliente. El betún así obtenido puede fabricarse "in situ" (Figura 1) interponiendo un equipo de mezclado y un depósito de almacenamiento intermedio para permitir el proceso de digestión entre los depósitos de betún y la amasadora, o en central independiente de la planta desde donde se transporta como cualquier otro betún.

En la vía seca, el polvo de caucho se introduce directamente en el mezclador de la planta de fabricación de la mezcla bituminosa en caliente como si fuera un árido más.

Los betunes con caucho se han normalizado en España con la Orden Circular 21/2007 complementada posteriormente con la Orden Circular 21bis/2009. Posteriormente se han incorporado a los artículos 542 y 543 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) mediante la Orden Circular 24/2008. En estos artículos se distinguen tres tipos de betunes con NFU y un tipo de mezcla asfáltica.

Los betunes fabricados con polvo procedente de NFU por vía húmeda pueden ser Modificados con caucho

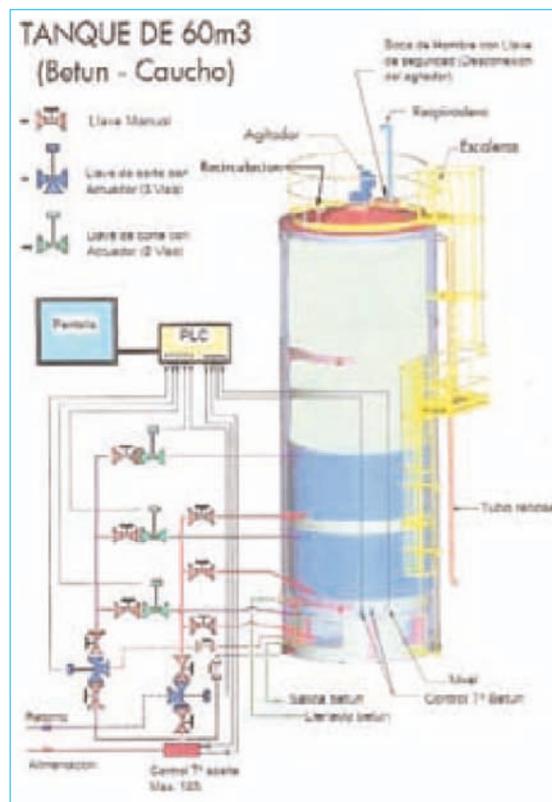


Figura 2. Tanque de eje vertical.

(BMC), Mejorados con caucho (BC) o Modificados de alta viscosidad con caucho (BMAVC). En la Orden se establecen las características que deben de cumplir y los posibles usos de cada uno de ellos.

La incorporación de polvo de NFU por vía seca sólo puede producir "Mezclas bituminosas en caliente con adición de caucho" que, por las dificultades que ofrece su control y la escasa garantía de fabricación de una mezcla homogénea, tanto en su mezclado como en su maduración, se limita su uso a carreteras con tráficos ligeros, T3 y T4.

En la red de carreteras del Estado se han realizado numerosos tramos experimentales y obras de refuerzo de gran

dimensión con estos productos desde el año 2004. (Tabla 1). En estas obras se han empleado todos los tipos de betunes con caucho y todas las técnicas de fabricación y aplicación a la carretera.

El polvo de NFU utilizado habitualmente es muy fino, con tamaños por debajo de 1 mm y preferentemente por debajo de 0,5 mm. Sólo en la vía seca se han utilizado tamaños mayores, siempre por debajo de 2 mm y preferentemente por debajo de 1,25/1,00 mm. En los tramos de vía seca realizados por la DGC, se utilizó un polvo con tamaño máximo 0,5 mm en porcentaje inferior al 1% sobre el total de la mezcla.

La dosificación de estos materiales requiere en general porcentajes algo mayores que los habituales para la misma fórmula de trabajo de la mezcla, si bien hay que considerar que en los betunes con caucho, entre el 6 y el 15 % del ligante es caucho. Por lo demás su formulación se realiza de la misma forma que con las mezclas tradicionales.

Desde el punto de vista de la ejecución, las diferencias con las mezclas tradicionales dependen del tipo de producto a emplear. Una característica común a estos materiales, que les diferencia de las mezclas con betunes de penetración, es la necesidad de elevar entre 5 y 10 °C la temperatura de fabricación para favorecer el proceso de digestión. Sin embargo, esta elevación

AÑO	PROVINCIA	CTRA.	EXPERIENCIA	UBICACIÓN
2004	Valladolid	VA-20	BETÚN MEJORADO CON CAUCHO, VÍA HÚMEDA	Ronda interior de Valladolid
2004	Valladolid	VA-20	BETÚN MEJORADO CON CAUCHO, VÍA HÚMEDA	Ronda interior de Valladolid
2004	Valladolid	A-6	BETÚN MODIFICADO CON CAUCHO, VÍA HÚMEDA	Medina del Campo - Tordesillas
2005	Valladolid	A-6	BETÚN MODIFICADO CON CAUCHO, VÍA HÚMEDA	Tordesillas-Medina del Campo CI
2005	Zamora	N-610	BETÚN MEJORADO CON CAUCHO, VÍA HÚMEDA	L.P. Valladolid-Castrogonzalo
2006	Valladolid	A-6	BETUNES MODIFICADOS DE ALTA VISCOSIDAD CON Y SIN CAUCHO	Ataquines
2006	Valladolid	N-601	BETÚN MODIFICADO DE ALTA VISCOSIDAD CON CAUCHO	Travesía de Medina de Rioseco.
2006	Valladolid	A-6	MEZCLA BITUMINOSA CON ADICION DE CAUCHO POR VÍA SECA	Variante de Tordesillas
2007	Valladolid	A-62	MEZCLA BITUMINOSA CON ADICION DE CAUCHO POR VÍA SECA	Variante de Tordesillas
2007	Palencia	A-65	BETÚN MEJORADO CON CAUCHO, VÍA HÚMEDA	Ronda Norte de Palencia
2009	Málaga	N-340	BETUNES MEJORADOS CON CAUCHO Y MODIFICADOS CON CAUCHO FABRICADOS EN CENTRAL	Málaga
2009	Málaga	N-340	BETUNES MEJORADOS CON CAUCHO Y MODIFICADOS CON CAUCHO FABRICADOS IN SITU	Málaga
2010	Orense	N-532	BETUNES MEJORADOS CON CAUCHO	Orense
2010	Valladolid	A-6	BETUNES MEJORADOS CON CAUCHO Y MODIFICADOS CON CAUCHO FABRICADOS EN CENTRAL	Arevalo - Medina el Campo
2011	Valladolid	A-6	BETUNES MEJORADOS CON CAUCHO IN SITU Y EN CENTRAL, Y BETUNES DE ALTA VISCOSIDAD CON CAUCHO	Arevalo - Medina el Campo
2012	Burgos	A-1	BETÚN MEJORADO CON CAUCHO IN SITU, VÍA HÚMEDA. RECICLADO EN CALIENTE	Segovia-Valladolid

Tabla 1. Tramos experimentales con mezclas bituminosas con polvo de caucho procedente de NFU.

de temperatura es también habitual cuando se utilizan betunes modificados con polímeros.

El proceso de digestión, en el que se produce la modificación del betún, precisa de un tiempo de almacenamiento de la mezcla a alta temperatura después de su fabricación y antes de su introducción en la amasadora de la planta. Cuando el betún con caucho se fabrica en central, este proceso ya se ha realizado y su empleo puede ser inmediato, mientras que cuando la fabricación se hace "in situ" es necesario tener un almacenamiento intermedio donde la mezcla debe reposar, al menos, 8 horas antes de su empleo.

Un elemento crítico en estos ligantes es su estabilidad. En general, cuando se almacenan por tiempos largos,

tienden a sedimentarse. Este fenómeno ha producido dificultades cuando se han utilizado los tanques horizontales tradicionales existentes en las plantas para el almacenamiento del ligante. La sedimentación en sus fondos y su depósito alrededor de las resistencias eléctricas que mantienen el betún caliente ha provocado problemas en las obras por acumulación de sedimentos en el fondo de los tanques.

Para superar estos problemas, la Orden Circular 21bis/2009 prescribe la utilización de tanques verticales con agitación continua y recirculación del ligante. Estos tanques calorifugados externamente, mantienen la temperatura mediante circulación de aceite a alta temperatura por el exterior del depósito (fig 1). Estos tanques resuelven tanto el problema del almacenamiento como

el de la digestión, permitiendo el almacenaje previo a su uso a alta temperatura durante las 8 horas prescritas.

La fabricación de la mezcla asfáltica suele requerir un tiempo de amasado algo mayor que el de una mezcla tradicional.

La mayor temperatura de estas mezclas hace que sean algo más críticas en este aspecto que las mezclas convencionales. Es preciso evitar enfriamientos durante el transporte y reducir en lo posible segregaciones térmicas en su extendido para lo cual es conveniente el uso de silos de transferencia re-homogeneizadores, pero en cualquier caso esta es una recomendación que también se debe aplicar a las mezclas convencionales.

Las temperaturas de compactación deben ser algo mayores que en las mezclas convencionales, si bien se debe continuar compactando por debajo de las mínimas habituales para evitar el efecto rebote por el cual las partículas elásticas de caucho que no han reaccionado con el betún, una vez terminada la compactación, si el betún no es aún suficientemente viscoso, pueden volver a recuperar su volumen inicial rompiendo la superficie de la mezcla. Este fenómeno se ha observado también en algunas obras después de un cierto tiempo de estar ejecutadas.

El comportamiento comprobado a lo largo de los años desde la realización de las obras ha sido satisfactorio sin que hayan presentado ningún problema particular de comportamiento o durabilidad.

Un punto aparte merecen los betunes modificados de alta viscosidad con caucho. Este es un ligante con un gran contenido de caucho, próximo al 20%. Este alto contenido en caucho le confiere una alta viscosidad, lo que permite conseguir una mezcla elástica y recubrir los áridos con una espesa película de ligante. Con estas condiciones se ha empleado en capas sobre hormigón o gravacemento con objeto de retardar la reflexión de las fisuras de estos materiales en superficie. Uno de los tramos experimentales se realizó empleando este material, dos betunes modificados con polímeros de alta viscosidad y un betún modificado con polímeros PMB 45/80-65. Los que mejor resistieron la propagación de las fisuras de retracción de la gravacemento existentes en el firme fueron los de alta viscosidad, si bien el espesor de la capa con betún modificado fue de tres centímetros, mientras que los otros betunes se extendieron en capa de 4 cm. De los betunes de alta viscosidad el mejor comportamiento se obtuvo con los modificados con polímeros, obviamente mucho más elásticos que el modificado con caucho.

RECICLADO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

Un segundo grupo de experiencias realizadas por la Dirección General de Carreteras se ha desarrollado en el campo de los reciclados.

El reciclado consiste básicamente en la reutilización de los materiales disgregados existentes en la carretera (áridos y betún) para su incorporación en la fabricación de nuevas mezclas o materiales que se vuelven a colocar en el firme con aportación de materiales vírgenes.

Hay que tener en cuenta que los firmes, aún envejecidos, contienen materiales de alto valor técnico, económico y medioambiental, como son los áridos y el betún. Estos materiales pueden volver a aprovecharse en la fabricación de nuevas mezclas ahorrando recursos naturales y reduciendo la contaminación generada en su producción, aparte de suponer un ahorro económico importante.

Existen diversas tecnologías para el reciclado de firmes, que básicamente se agrupan en dos grupos diferenciados, el reciclado en caliente y el reciclado en frío.

El reciclado en caliente puede realizarse in situ o en central, aunque hoy en día, prácticamente todo el reciclado en caliente se realiza en central.

El reciclado en frío, por el contrario, se realiza fundamentalmente in situ, aunque empieza a haber experiencias de reciclado en central con emulsión en forma de mezclas templadas. El reciclado in situ en frío puede hacerse con emulsión o con cemento, cada uno con sus propias peculiaridades.

En la Tabla 2 se presentan los tramos experimentales promovidos por la DGC en la Red de Carreteras del Estado (RIGE).

En el año 1995, se realizó en Zamora una primera y única experiencia con un reciclado in situ en caliente. Esta técnica exige la utilización de una central móvil que se traslada a lo largo de la carretera según avanzan los trabajos de reciclado. El equipo de reciclado in situ en caliente conforma un gran tren que consta de un primer grupo de equipos para el fresado de la carretera y su traslado a la central móvil, la central de tambor-secador-mezclador que permite la incorporación del ligante regenerante y el material fresado sin contacto directo con la llama, y el equipo de extendido. Esta técnica se ha utilizado escasamente, siendo esta experiencia la única realizada en España. Entre los problemas que se tuvieron en su momento destacó la importante emisión de humos a la

AÑO	PROVINCIA	CTRA.	EXPERIENCIA	UBICACIÓN
1995	Zamora	N-525	RECICLADO IN SITU EN CALIENTE	Mombuey - Padomelo
1995	Cáceres	N-630	RECICLADO IN SITU CON CEMENTO	L.P. Salamanca - Cañaveral
1995	Cáceres	N-630	RECICLADO IN SITU CON EMULSIÓN	Cañaveral Sur - Cáceres
2000	Cáceres	N-V	RECICLADO IN SITU CON EMULSIÓN	Navalmoral de la Mata
2003	Palencia	N-120	RECICLADO IN SITU CON EMULSIÓN	Osorno-L.P. León
2006	Cáceres	N-110	RECICLADO IN SITU CON EMULSIÓN Y 0,5 % DE CEMENTO	LP Avila - Navaconcejo
2008	Cáceres	A-5	RECICLADO EN CALIENTE DE ALTA TASA	L.P. Toledo-Almaraz (Cáceres)
2010	Teruel	N-211	RECICLADO IN SITU CON EMULSIÓN	Caminreal-Castel de Cabra
2011	Cáceres	N-521	RECICLADO EN CALIENTE DE TASA MEDIA	Cáceres- Malpartida
2012	Burgos	A-1	BETÚN MEJORADO CON CAUCHO IN SITU, VÍA HÚMEDA. RECICLADO EN CALIENTE	Segovia-Valladolid

Tabla 2. Tramos experimentales de la DGC con reciclado de firmes.

atmósfera. Desde el punto de vista del comportamiento de la mezcla, los resultados que se obtuvieron sobre testigos dieron valores muy buenos tanto en cuanto a su estabilidad, módulo y resistencia a fatiga, como en cuanto a regularidad superficial del firme terminado, recrecido en este caso con 4 cm de mezcla drenante.

El reciclado en caliente en central es actualmente el método habitual de reciclado en caliente y el único admitido por la normativa española.

En principio, el artículo 542 de PG-3 admite sin condiciones especiales la incorporación de hasta un 10% (en la próxima revisión del artículo un 15%) de fresado (RAP) en las capas de mezclas bituminosas que no sean de rodadura. Para porcentajes superiores se deben cumplir las prescripciones establecidas en el artículo 22 del PG-4.

En el reciclado en caliente en central se diferencia habitualmente entre tasas de reciclado por encima del 25 % (alta tasa) y entre el 10% y el 25% (tasa media). Desde la Dirección General de Carreteras se han promovido actuaciones con ambos tipos de tasa.



Figura 3. Planta discontinua con doble tambor-secador para reciclado en caliente.

Para conseguir un buen resultado y decidir la tasa de reciclado que se puede incorporar a la mezcla, el elemento fundamental es la calidad del RAP y su homogeneidad en cuanto a contenido de ligante y granulometría.

En cuanto a la granulometría, es siempre conveniente clasificar el RAP en, al menos, dos tamaños arena y gruesos y rechazar los tamaños superiores a 25 mm. Dado que en la operación de fresado se suelen obtener tamaños superiores en función del estado del firme antiguo, es conveniente establecer un tratamiento del fresado que, sin romper el árido ni generar más finos, disgregue el material y lo reduzca al tamaño requerido. Por último, para evitar la humectación del RAP este se debe acopiar a resguardo de la lluvia, en zonas cubiertas o tapado con lonas, especialmente si su uso no va a ser inmediato.

La mezcla reciclada en caliente se puede fabricar en plantas continuas o discontinuas.

En las experiencias realizadas con planta discontinua, la incorporación de RAP en alta tasa ha conllevado la instalación de un segundo tambor-secador sólo para el material fresado, mientras que para tasas medias se ha incorporado el RAP directamente al mezclador (Figura 3).

En la fabricación con plantas continuas se ha utilizado una planta de tipo double barrel, que dispone de dos tambores concéntricos, en el interior se encuentra el quemador y a él se incorpora el árido virgen, mientras que en el exterior se incorpora el RAP, el betún y el filler, produciéndose la mezcla. Con este tipo de planta se ha llegado a tasas de hasta el 50% de RAP.

Una vez fabricada la mezcla bituminosa reciclada su puesta en obra no presenta ninguna dificultad añadida respecto a las mezclas convencionales.

La mayor parte de las experiencias de reciclado “in situ” en frío se han realizado con emulsión, si bien también se ha realizado alguna experiencia con cemento.

El proceso en ambos casos es, en cierto modo, similar. El equipo a utilizar es una recicladora que incorpora un tambor de fresado, una cámara de mezclado y un dosificador de ligante, ya sea emulsión o lechada de cemento.

En el tramo experimental de reciclado in situ con cemento se utilizaron dos recicladoras en paralelo, desplazadas 150 m entre sí, WIRTGEN 2100 DCR de anchura de fresado de 2 m para reciclar una profundidad de 25-30 cm de materiales asfálticos y granulares, obteniéndose una capa semirrígida sobre la que se apoyó un refuerzo de mezcla bituminosa en caliente de 10 cm. Las dos recicladoras estaban alimentadas por un camión dosificador de cemento y un camión cuba de agua. Se utilizó un porcentaje de cemento de un 5 % que una vez terminada la obra y comprobada su resistencia con testigos pareció excesivo, debiéndose haber bajado a porcentajes del 4 al 4,5 %. La capa reciclada sólo se prefisuró en una cierta longitud, que al cabo del tiempo es la que mejor se ha comportado de cara a la reflexión de las fisuras de retracción en superficie. La compactación se realizó sin problemas, obteniéndose densidades superiores al 97 % de la densidad Próctor modificado. Esta técnica produce capas similares a las de suelocemento, y como tal se debe tener en cuenta en el dimensionamiento del firme resultante.

Como se ve en la tabla 2, se han realizado numerosas experiencias de reciclado con emulsión en la red de carreteras del Estado, incluyendo una en la que además se incorporó un 0,5 % de cemento de forma manual por delante de la extendidora.

Los espesores de reciclado han estado entre los 6 y los 12 cm. El proceso, como en el caso del reciclado con cemento, precisa de una recicladora que incorpora el tambor de fresado, una cámara de mezclado, el dosificador de emulsión y una regla de extendido. La preparación de las obras requiere, como en todos los casos de reciclado in situ, de una campaña de calcatas y testigos intensa para determinar la homogeneidad del material existente



Figura 4. Reciclado en frío con emulsión.

en la carretera y poderla tramificar a efectos de diseño de la fórmula de trabajo. La fórmula de trabajo debe determinar el espesor de reciclado, la granulometría del material fresado, el tipo de emulsión y la proporción de ligante residual obtenida a través del ensayo de inmersión-compresión, la densidad y humedad óptima de compactación referidas al ensayo Próctor modificado, el agua a aportar y la densidad mínima a obtener. Durante la ejecución hay que estar pendiente de que, durante el fresado, no queden bloques de mezcla antigua de tamaño superior al admitido sin disgregar para apartarlos. Otro de los problemas de esta técnica es que se necesita un tiempo hasta que se produzca el curado de la capa y la eliminación de la humedad, y la capa reciclada adquiera la consistencia adecuada. Problema que se acrecienta en épocas de lluvia o humedad relativa elevada, por lo que es recomendable ejecutar las obras durante las

6.3 IC- Aplicación de las técnicas de reciclado de Firmes (Art.7.4)				
	T00	T0	T1	T2-T4
Calzada	No se contemplan	10 cms. MBC MbRCC	5 cms. MBC MbRCC 5 cms. MBC MbRFE	MBC rodadura (S ó D) MbRCC MBC rodadura (S ó D) MbRFE MBC rodadura (S ó D) RC
Arcén	No se contemplan	Rodadura MbRCC	Rodadura MbRCC Rodadura MbRFE	Rodadura MbRCC Rodadura MbRFE Rodadura RC
		MbRCC: Reciclado en caliente en central (Art. 22 PG-4)	MbRFE: Reciclado in situ en frío con emulsión (Art. 20 PG-4)	RC: Reciclado in situ con cemento (Art. 21 PG-4)

Cuadro 1. Aplicación de las técnicas de reciclado de firmes.

AÑO	PROVINCIA	CTRA.	EXPERIENCIA	UBICACIÓN
2007	Málaga	N-331	MEZCLA SEMICALIENTE (aditivado)	Málaga
2008	Palencia	A-67	MEZCLA SEMICALIENTE (aditivado)	Alar del Rey
2010	Tarragona	N-240	MEZCLA SEMICALIENTE (aditivado)	Gandesa
2011	Segovia	N-110	MEZCLA TEMPLADA FABRICADA EN PLANTA ESPUMANDO EL BETÚN CON EL AGUA DE LAS ARENAS	Ayllón
2012	Burgos	A-1	MEZCLA RECICLADA TEMPLADA DE TASA TOTAL (emulsión)	Lerma

Tabla 3. Tramos experimentales con mezclas a baja temperatura.

estaciones cálidas. Por ello, cuando es necesario abrir al tráfico de forma rápida, se tiene que extender un riego de protección con una emulsión de rotura rápida y un árido de cobertura, habiéndose utilizado en algunos casos una lechada bituminosa. Por último, en este caso es absolutamente imprescindible terminar con el extendido de una capa de mezcla bituminosa en caliente como capa de rodadura.

La utilización de las distintas técnicas de reciclado está establecida en la Orden Circular 8/2001 y en la Instrucción de Carreteras 6.3 IC en función del tráfico y de su posición en la plataforma de la carretera como se indica en el Cuadro 1.

Cómo se puede comprobar no en todos los casos es posible utilizar todas las técnicas, estando más limitadas para los tráficos más pesados. Además, para el dimensionamiento del firme, si no se dispone de su ley de fatiga, se han establecido coeficientes de correlación entre las mezclas recicladas y las mezclas bituminosas en caliente, inferiores a 1, excepto para el reciclado in situ con cemento que se asemeja a un suelocemento, lo que significa una menor capacidad estructural de estas capas a efectos de diseño.

MEZCLAS A BAJA TEMPERATURA

Se denominan así las mezclas bituminosas que precisan menos temperatura que las convencionales, tanto para su fabricación como para su compactación.

En función de la temperatura de fabricación se denominan semicalientes, si es superior a 100°C, o templadas si es inferior a 100 °C.

Existen diversas tecnologías para conseguir bajar la temperatura de

fabricación de las mezclas. En las mezclas semicalientes, la bajada de la temperatura de fabricación se puede conseguir mediante el empleo de aditivos, orgánicos (ceras) o químicos (tensoactivos), o por espumación del betún, directa (agua) o indirecta (zeolitas).

Las mezclas templadas pueden obtenerse mediante el empleo de emulsiones o bien por espumación del betún.

En las experiencias de la red de carreteras del Estado, Tabla 3, se han utilizado varias de estas técnicas, siendo la más habitual el empleo de betunes fabricados en central que incorporan aditivos, generalmente del tipo tensoactivo o ceras.

Los betunes así aditivados presentan características algo diferentes a las del betún original, con intervalos de plasticidad mayores y mayor rigidez a bajas temperaturas, pero cuando la temperatura supera un cierto valor la viscosidad disminuye bruscamente facilitando la envuelta del árido sin necesidad de alcanzar las temperaturas de mezclado habituales.

Las reducciones de temperatura que se han conseguido con estos betunes han sido del orden de 30 °C.

La ejecución de las obras no supuso ningún problema ni cuidado adicional al necesario para las obras con mezclas en caliente. La menor temperatura de fabricación permite mayores intervalos de tiempo entre la

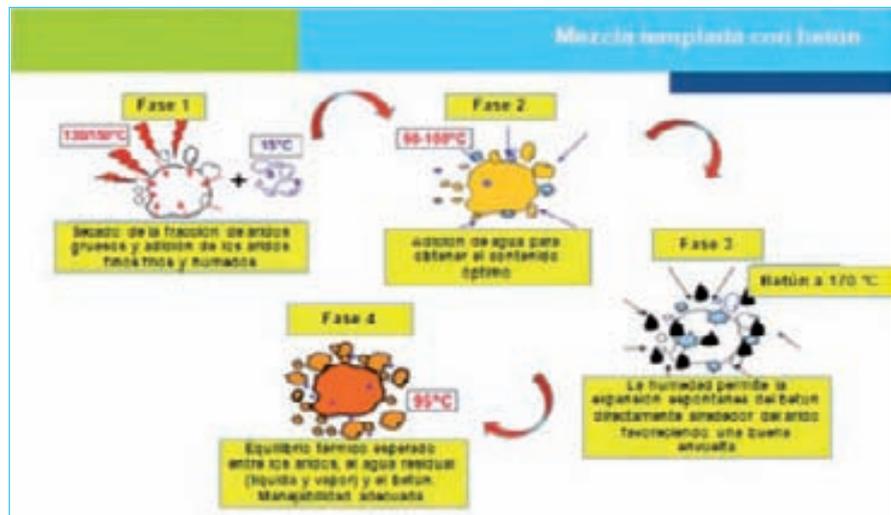


Figura 5. Proceso de emulsificación del betún con la humedad de las arenas (fuente EIFFAGE).



Figuras 6 y 7. Proceso de emulsificación del betún con la humedad de las arenas (fuente EIFFAGE).

AÑO	PROVINCIA	CTRA.	EXPERIENCIA	UBICACIÓN
2008	Málaga	A-7	PAVIMENTO DOBLE DRENANTE FONOABSORBENTE	Málaga
2007	Albacete	A-31	REHABILITACIÓN DE FIRME CON PAVIMENTO DE HORMIGÓN	Variante de Albacete
2010	Albacete	A-31	REHABILITACIÓN DE FIRME CON PAVIMENTO DE HORMIGÓN	Albacete

Tabla 4. Otros tramos experimentales.

porte a mayor distancia y proporcionan además una mayor seguridad laboral y un mejor entorno de trabajo. Las densidades que se consiguen son simila-

fabricación y el extendido, dado que el gradiente de temperatura es menor. Por otra parte, estas mezclas se extienden con mayor facilidad y producen un entorno de trabajo mejorado.

Otro tipo de mezclas experimentadas, dentro del grupo de mezclas de baja temperatura, han sido las mezclas templadas. Se han realizado dos experiencias en la red de carreteras del Estado, una con betún espumado y la otra con emulsión.

En la primera, la espumación del betún se consiguió mediante la introducción en la amasadora de las arenas sin secar ni calentar. Al entrar en contacto el agua de estas arenas con el betún a alta temperatura se produce su espumación y por tanto se facilita la envuelta del árido.

El árido grueso se calienta a 130-150 °C, al añadirle las arenas su temperatura baja a 90-100°C. En ese momento se introduce el betún a 160-170°C produciéndose su espumación en contacto con la humedad existente proporcionada por las arenas. Al final se consigue una mezcla a 95°C con una buena manejabilidad. El porcentaje de humedad final en la mezcla durante el extendido es del orden del 0,5% (Figura 5).

El extendido y compactación de estas mezclas es similar al de las mezclas en caliente, si bien, al disponer de menores gradientes de enfriamiento, permiten un trans-

porte a las del las mezclas en caliente con los mismos trenes de compactación (Figuras 6 y 7).

Por último, dentro de este grupo de mezclas a baja temperatura y combinando esta técnica con la de reciclado, se ha realizado una experiencia en una concesión de una autovía, en un tramo sobre una vía de servicio.

En este caso se contaba con una planta discontinua adaptada al reciclado con la incorporación de un segundo tambor-secador exclusivo para el tratamiento del RAP. Los problemas en este tipo de mezclas surgen de la adaptación de las plantas, inicialmente preparadas para la fabricación en caliente, generándose problemas por el rango de temperaturas de funcionamiento, la necesidad de que ni la llama ni los gases a altas temperaturas afecten al RAP, la pegajosidad del material en el entorno de los 100°C que dificulta su fluidez dentro del sistema y puede llegar a obstruir la torre de elevación, la reducción de rendimientos, etc.

OTRAS EXPERIENCIAS

Otra experiencia de marcado carácter medioambiental realizada en los últimos años, ha sido un tramo con pavimento fonoabsorbente, que reduce la emisión del ruido de rodadura debido a la absorción y atrapamiento de las ondas sonoras generadas. Esto se consigue constru-

yendo un pavimento formado por dos capas drenantes, la superior de granulometría más fina y menor porcentaje de huecos y la inferior de granulometría más gruesa y mayor porcentaje de huecos.

Mientras que la capa superior se fabricó con un betún modificado con polímeros PMB 45/80-65, en la capa inferior se utilizó un betún con alto porcentaje de polímeros con las características de los betunes modificados de alta viscosidad BMAVC-3 de la Orden Circular 21/2007 para conseguir dejar una película de mayor espesor alrededor de los áridos y conseguir una mayor cohesión de la mezcla.

Los resultados de la medición del ruido de rodadura arrojan reducciones, en función del método de medida, entre 3,7 y 6 dB(A) respecto a un pavimento con mezcla convencional AC22, y entre 0,75 y 2,4 dB(A) respecto a un pavimento drenante de una sola capa.

Las otras dos experiencias se realizaron con motivo de la rehabilitación de firmes de hormigón, estructural en un caso y superficial en el otro.

En el caso de la rehabilitación estructural, las obras consistieron en la consolidación de las losas mediante inyecciones de lechada de cemento, el sellado de juntas y el recrecido con 8 cm de mezclas bituminosas, interponiendo entre las losas y las mezclas bituminosas un geotextil impregnado colocado sobre un riego de adherencia.

En la rehabilitación superficial no se consolidaron las losas, se extendió una capa de mezcla bituminosa de regularización y sobre ella se extendió un geotextil impregnado y dos capas de mezclas, intermedia y rodadura, con un espesor total de 8 cm.

CONCLUSIONES

En los últimos años ha existido un importante desarrollo en el campo de las mezclas bituminosas.

La mayor parte de las innovaciones han ido dirigidas a la mejora de los impactos medioambientales de este tipo de obras.

El aprovechamiento de residuos como el polvo de NFU, con objeto no sólo de reducir el impacto de su vertido sino también de la mejora de las cualidades de las mezclas, ha sido profusamente probado, llegándose a publicar una normativa específica para su uso.

El reciclado se ha experimentado en todas sus versiones. Existe normativa específica sobre esta técnica que indica

las condiciones en que se puede aplicar. El reciclado en caliente en central ha demostrado su potencialidad para conseguir mezclas de calidad, si bien necesita adaptaciones en las plantas para ofrecer el máximo de garantías.

Las mezclas de baja temperatura de fabricación y compactación son en este momento la opción más prometedora por las ventajas que ofrecen en relación con el medio ambiente y la seguridad laboral, sin afectar a la calidad de las mezclas producidas. Sin embargo, la experiencia en este momento es escasa debido al poco tiempo que se lleva experimentando con ellas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- I. Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras. Orden circular 8/2001 "Reciclado de firmes". Edición 2003.
- II. Ministerio de Fomento. Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes. PG-3.
- III. Morillo, D. y Gasca, C (1995) "Experiencia de un reciclado en caliente "in situ"" Revista Rutas.
- IV. Payán de Tejada, F.J. (2004) "Empleo de polvo de neumáticos fuera de uso en mezclas bituminosas". IX Jornadas de Conservación de Carreteras. Salamanca.
- V. Blanco, JM. (1996) "Experiencia de reciclado en frío in situ con emulsión N-630 Tramo: Cañaveralel-Cáceres Jornada sobre reciclado de capas de firme con emulsión." 1996.
- VI. Hernando, A.; (1998) "Reciclado en frío in situ de mezcla bituminosa con emulsión carretera N-II, pk 394,400 a 443,600, provincia de Huesca" IV Congreso Nacional de firmes. Segovia y también, incluyendo informe del CEDEX, en "Jornada sobre reciclado de capas de firme con emulsión. 1996".
- VII. García, A. (2005) "Reciclado en caliente en central continua" X Jornadas de Conservación de Carreteras. Cáceres.
- VIII. Güell, A (2005) "Reciclado de firmes. Reciclado en caliente en central discontinua" X Jornadas de Conservación de Carreteras. Cáceres.
- IX. Payán de Tejada, F.J. (2005) "Empleo de polvo de neumáticos fuera de uso en mezclas bituminosas" XV Congreso Mundial de Carreteras de IRF en Bangkok.

- X. Payán de Tejada, F.J. (2008) "Aprovechamiento del polvo de caucho procedente de NFU en la fabricación de mezcla bituminosas. Normativa y experiencia de la Dirección general de Carreteras del Ministerio de Fomento". VIII Congreso Nacional de firmes. Valladolid.
- XI. Bretón, L.; Soto, J.A.; Lucas, F.J.; Del Cerro, J.; Güell, A (2008) "Mezclas semicalientes con betunes de baja temperatura de fabricación y extendido. Experiencias realizadas." III Jornada Técnica. ASEFMA.
- XII. Del Cerro, J. (2008) "Mezclas bituminosas semicalientes. Experiencias realizadas en la Red de Carreteras del Estado. Provincia de Málaga". VIII Congreso Nacional de firmes. Valladolid.
- XIII. Del Cerro, J. (2008) "Mezclas bituminosas de baja sonoridad. Experiencias realizadas en la Red de Carreteras del Estado. Provincia de Málaga". VIII Congreso Nacional de firmes. Valladolid.
- XIV. Lorenzo, C; García A; Soto, J.A.; Paris, A (2009) "Reciclado en caliente con altas tasas en la provincia de Cáceres". IV Jornada Nacional ASEFMA, Madrid.
- XV. Blanco, J.M.; Cabanillas, A.; Romo, J. (2009) "Experiencias de reciclado de firmes en la red de carreteras del Estado en Cáceres. Reciente reciclado en caliente en central mediante planta discontinua". IV Jornada Nacional ASEFMA, Madrid.
- XVI. Paris, A.; Romo, J.; Del Val, M.A.; (2010) "Análisis del comportamiento de un firme reciclado en central en caliente con alta tasa tras un año de servicio". V Jornada Nacional ASEFMA, Madrid.
- XVII. Navas, J.; Hernández, A.; García, A.; Soto, J.A. (2010) "Puesta en obra de una mezcla semicaliente en la N-420 a la altura de Gandesa (Tarragona)." V Jornada Nacional ASEFMA, Madrid.
- XVIII. Marcobla, J.R.; García, J (2012) Autovía del Arlanzón. Un nuevo hito en el proyecto global de firmes de SACYR. Rutas, nº 152 sept-oct 2012.
- XIX. García, J.L.; Guisado, F. (2013) "Rehabilitación sostenible de pavimentos: innovaciones en tecnología y desarrollos de mezclas para aprovechamiento total de materiales con bajo consumo de energía". 



SUPERMICRO

Pavimento low cost para carreteras verdes



Respetar
energía
emitir CO₂



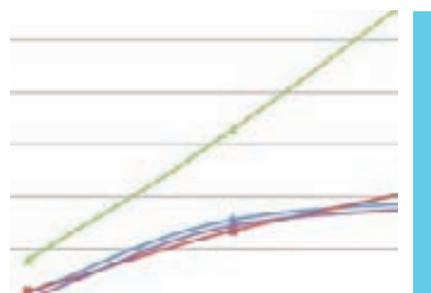
Capitán Haya, 1 planta 15 - 28020 Madrid (España)

Tel: +34 653 90 51 44

info@cprtheefficientway.com

www.cprtheefficientway.com

Ensayo EBADE. Evaluación de la resistencia a la fisuración de las mezclas bituminosas



Félix E. PÉREZ-JIMÉNEZ

Universidad Politécnica de Cataluña. BarcelonaTech
Barcelona, España

Ramón BOTELLA

Universidad Politécnica de Cataluña. BarcelonaTech
Barcelona, España

Rodrigo MIRÓ

Universidad Politécnica de Cataluña. BarcelonaTech
Barcelona, España

Adriana Martínez

Universidad Politécnica de Cataluña. BarcelonaTech
Barcelona, España

RESUMEN

La fisuración por fatiga es uno de los procesos de deterioro más frecuentes e importantes que tienen lugar en los firmes flexibles. Para evaluar la resistencia a fatiga que tienen las mezclas bituminosas que componen estos pavimentos se realizan ensayos de larga duración que requieren un equipamiento específico. Por esta razón algunos investigadores están estudiando procedimientos alternativos más sencillos de implementar y que reduzcan el tiempo de ensayo. El ensayo EBADE (Ensayo de BArrido de DEformaciones) es un ensayo cíclico de tracción-compresión a deformación controlada sobre probetas prismáticas, desarrollado en el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña-BarcelonaTech, en el que progresivamente se va aumentando el nivel de deformación impuesto, permitiendo evaluar el proceso de deterioro de la mezcla bituminosa, a distintos niveles de deformación, hasta llegar a su rotura. En este trabajo se presentan los resultados de la aplicación del ensayo EBADE para analizar el efecto de la temperatura en la respuesta a la fisuración por fatiga de mezclas densas fabricadas con diferentes tipos de betunes, a partir de la variación del módulo y de la deformación de rotura, así como de la energía disipada con la temperatura. Estos resultados muestran claramente la diferencia entre el comportamiento de la mezcla fabricada con un betún modificado con polímeros, respecto a la misma mezcla fabricada con betunes convencionales.

Palabras clave: Fisuración, Mezclas bituminosas, EBADE, Fatiga

INTRODUCCIÓN

Entre los deterioros más habituales que sufre el firme de una carretera está la fisuración por fatiga de las capas de mezcla bituminosa. Sin embargo, es poco frecuente tener en cuenta la propiedad correspondiente, la resistencia a la fatiga, durante el diseño de las mezclas debido a la complejidad de los ensayos que deben realizarse y al tiempo que demandan. Es por ello que en los cálculos de dimensionamiento de firmes se suele recurrir a leyes de fatiga estandarizadas, que pueden diferir significativamente de la de la mezcla diseñada que se va a construir.

Otro aspecto que merece especial atención es la temperatura a la que se realiza el ensayo, comúnmente establecida en 20°C. De este modo se evalúa el comportamiento de las mezclas sin tener en cuenta el efecto de las altas y/o bajas temperaturas (Pérez-Jiménez et al, 2011).

Aunque existen muchos enfoques sobre cómo analizar el comportamiento a fatiga en mezclas bituminosas sometidas a la acción repetida de tensiones inducidas por las cargas del tráfico (Di Benedetto et al, 2003), el proceso de fatiga acaba con la fisuración y la posterior propagación de las fisuras a través del material. Dos son los parámetros fundamentales que gobiernan este comportamiento: la rigidez del material, que permite absorber mayor o menor cantidad de tensión, y su ductilidad o deformación a la que rompe. Por tanto, a partir del módulo y el nivel de deformación al que se produce la rotura de la mezcla, es posible conocer la mejor o peor respuesta de la mezcla frente al efecto de las cargas repetidas, su comportamiento a fatiga.

En este sentido, en el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña-BarcelonaTech se ha desarrollado un nuevo ensayo para caracterizar el comportamiento a fatiga, tanto de mezclas bituminosas como de betunes (Pérez-Jiménez et al, 2013, 2012, 2011; Botella et al, 2012), a partir de estos dos parámetros, que puede aplicarse a diferentes temperaturas.

El estudio que se presenta en este artículo describe el análisis del efecto de 4 betunes diferentes (dos convencionales, uno modificado con polímeros y otro con polvo de neumáticos) sobre la resistencia a fatiga



de una mezcla bituminosa de tipo denso a diferentes temperaturas: 20, 5 y -5°C.

ENSAYO EBADE

El ensayo EBADE es un ensayo cíclico de tracción-compresión a deformación controlada, aplicado sobre probetas prismáticas de 5 cm de lado por 6 cm de altura, en las que se practica una entalla para inducir su rotura. Durante el ensayo se va aumentando el nivel de deformaciones impuesto; cada nivel de deformación es mantenido durante un número constante de ciclos, lo que permite analizar el proceso de deterioro de la mezcla bituminosa a distintos niveles de deformación hasta llegar a su rotura, Figura 1.

En particular, el ensayo EBADE se realiza aplicando sucesivos escalones de deformación cada 5000 ciclos, a una frecuencia de aplicación de carga de 10 Hz. Para el primer escalón se ha fijado una amplitud de deformación de $2.5 \cdot 10^{-5}$, que se va aumentando en incrementos de $2.5 \cdot 10^{-5}$ hasta llegar a la rotura del material. Como criterio de fallo por fatiga de la mezcla se ha establecido el nivel de deformación en el que la máxima energía disipada por ciclo se reduce a la mitad. La energía disipada va aumentando con el nivel de deformación hasta que se inicia el fallo del material, momento en que decrece rápidamente.

Durante el ensayo se determinan los siguientes parámetros de la mezcla:

Tensión:

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (1)$$

donde F es la fuerza registrada y S la superficie de fractura.

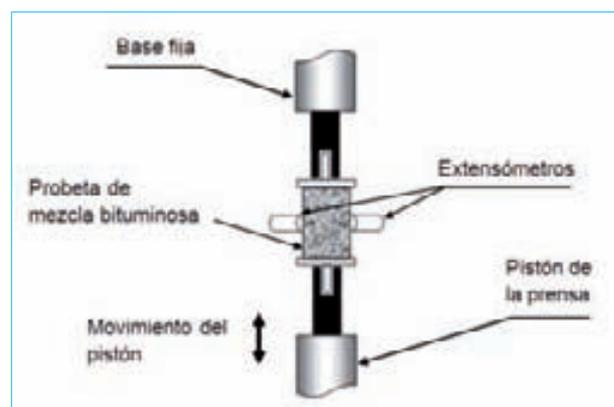


Figura 1. Fotografía y esquema del ensayo EBADE.

Módulo complejo:

$$E^* = \frac{\sigma_{max}}{\epsilon_{max}}, \quad (2)$$

donde σ_{max} es la semi amplitud de la tensión registrada en un ciclo y ϵ_{max} es la semi amplitud de la deformación impuesta.

Densidad de energía disipada:

$$E_D = \frac{g}{S} \cdot \frac{1}{2} |(\sigma_1 \epsilon_2 + \sigma_2 \epsilon_3 + \dots + \sigma_{n-1} \epsilon_n + \sigma_n \epsilon_1) - (\sigma_2 \epsilon_1 + \sigma_3 \epsilon_2 + \dots + \sigma_n \epsilon_{n-1} + \sigma_1 \epsilon_n)|, \quad (3)$$

donde g es la aceleración de la gravedad, S la superficie de fractura y σ_i y ϵ_i los n valores de la tensión y la deformación obtenidos a lo largo de un ciclo.

La densidad de energía disipada aumenta con el nivel de deformación impuesta. Para un mismo nivel de deformación la densidad de energía disipada disminuye con el número de ciclos aunque esta variación depende del nivel de deformación. A bajos niveles de deformación, solo se pierde energía al principio de los ciclos y después permanece constante, mientras que a altos niveles de deformación la pérdida de energía tiene lugar a lo largo de todo el ciclo. La pérdida de energía a bajos niveles de deformación se debe, en su mayor parte, a la tixotropía y al comportamiento viscoelástico del material y apenas existe daño (Pérez-Jiménez et al, 2012).

TRABAJO DESARROLLADO

Se ha seleccionado una mezcla de tipo denso y tamaño máximo 16 mm, con una granulometría ajustada al huso

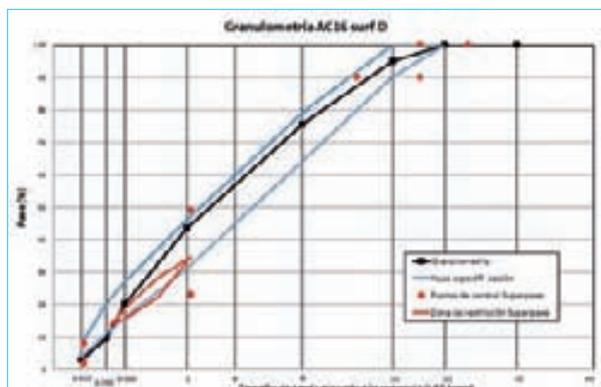


Figura 2. Granulometría de la mezcla utilizada.

AC16D (artículo 542, PG-3) establecido en la normativa española, que a su vez cumpla con los puntos de paso y la zona restringida de las especificaciones Superpave, fabricada a partir de 4 betunes diferentes: dos betunes de la misma penetración pero distinta procedencia (B 50/70), un betún modificado con polímeros (BM-3c) y un betún mejorado con polvo de neumático fuera de uso (BC 35/50), utilizando un mismo contenido de ligante en todos los casos (5.0% s.m.). Sobre las cuatro mezclas resultantes, se aplicará el ensayo EBADE a tres temperaturas: 20, 5 y -5 °C.

En la Figura 2 se puede apreciar la granulometría de los áridos seleccionada. En la Tabla 1 se presentan las características de los ligantes estudiados.

El tipo de árido utilizado en la fabricación de las mezclas bituminosas es de naturaleza caliza; el filler es también de naturaleza caliza y proviene del polvo de estos mismos áridos.

Para cada tipo de mezcla se ha fabricado una serie de probetas tipo Marshall, compactadas con 75 golpes por cara. Cada probeta, una vez fabricada, se corta para

CARACTERÍSTICAS	UNIDAD	MÉTODO DE ENSAYO	B 50/70 (1)	B 50/70 (2)	BM3C	BC 35/50
Penetración a 25°C	0,1mm	EN 1426	59	68	67	50
Punto de Reblandecimiento	°C	EN 1427	50.2	49.4	65.8	61.8
Punto Fragilidad Fraass	°C	EN 12593	-11	-11	-17	-16
Recuperación elástica a 25°C	%	EN 13398			88	59
Resistencia al envejecimiento						
Variación de masa	%	EN 12607-1	0.02	0.07	0.04	0.07
Penetración retenida	%	EN 1426	62	59	68	66
Incremento punto de reblandecimiento	°C	EN 1427	7.0	7.2	4.4	7.7

Tabla 1. Especificaciones de los betunes utilizados

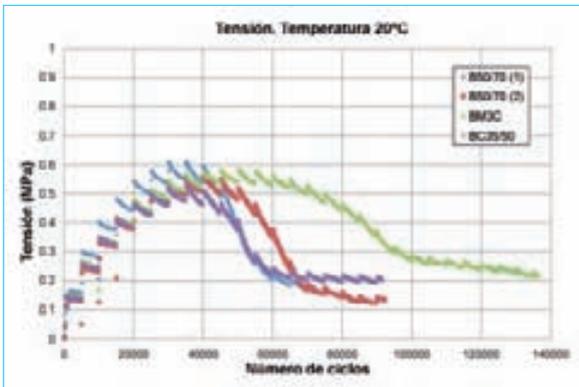


Figura 3. Evolución de la tensión registrada con el número de ciclos para las diferentes mezclas, a la temperatura 20°C.

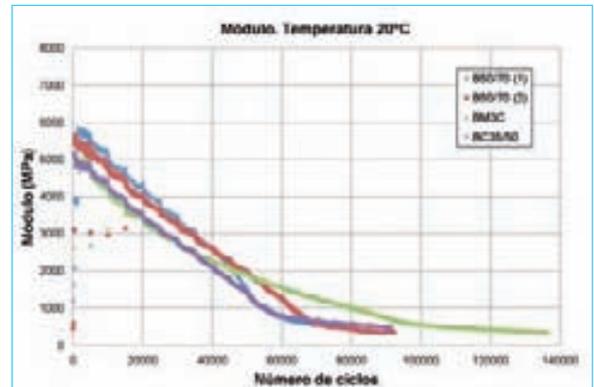


Figura 4. Evolución del módulo con el número de ciclos para las diferentes mezclas, a la temperatura 20°C.

darle la forma prismática (sección de 5x5 cm² y altura de unos 6 cm), realizando las dos entallas en la zona central con objeto de reducir el área de la probeta e inducir la rotura en esa sección. Se han ensayado 3 probetas por mezcla y condición de ensayo.

En las Figuras 3, 4 y 5 se muestra, a modo de ejemplo, la evolución de la tensión, el módulo y la energía disipada respectivamente, a la temperatura de 20°C, para las 4 mezclas consideradas, en función del número de ciclos.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

La Figura 6 muestra la variación del módulo inicial con la temperatura y permite observar que las mezclas con los 4 betunes tienen módulos similares para las tres temperaturas, con una variación significativa entre 20 y -5°C, donde el módulo se multiplica por 4 aproximadamente.

La variación de la densidad de energía disipada acumulada con la temperatura se representa en la Figura 7. Los resultados muestran que los valores de energía para la mezcla con el betún BM3c a 20°C y a 5°C son altos, pero a -5°C se aproximan a los de las mezclas con

betunes convencionales. Por otro lado, la mezcla con betún-caucho BC35/50 exhibe menor energía disipada a -5°C y a 20°C.

En la Figura 8 se recogen los resultados del módulo, deformación de fallo y deformación a la tensión máxima para las tres temperaturas. A 20°C el módulo de la mezcla con betún BM3c es similar al de las otras tres mezclas mientras que la deformación a tensión máxima y la deformación de fallo son mucho mayores. Este comportamiento indica que la mezcla con betún BM3c es más tenaz y tiene mayor nivel de deformación, es decir, es capaz de soportar mayores esfuerzos y liberar mayor energía hasta el fallo.

A medida que la temperatura decrece, el módulo inicial aumenta y la deformación de fallo disminuye para todas las mezclas; a -5°C la deformación de fallo y la deformación a tensión máxima son muy similares. La mezcla con betún BC 35/50 tiene un comportamiento más frágil, especialmente a -5°C. Estos resultados muestran la capacidad de ensayos como el EBADE para evaluar la resistencia a fisuración por fatiga, ya que permite obtener 2 parámetros que caracterizan el fallo por fatiga: el módulo y la diferencia entre la deformación de fallo y

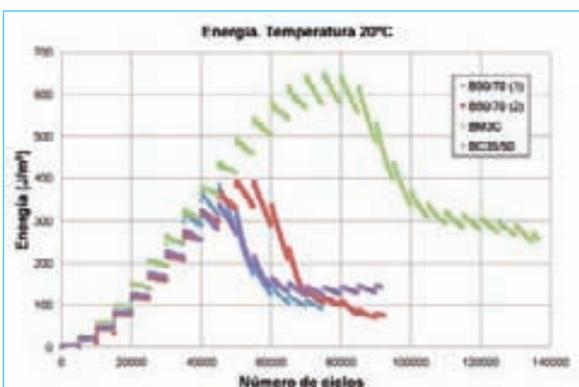


Figura 5. Evolución de la energía disipada con el número de ciclos para las diferentes mezclas, a la temperatura 20°C.

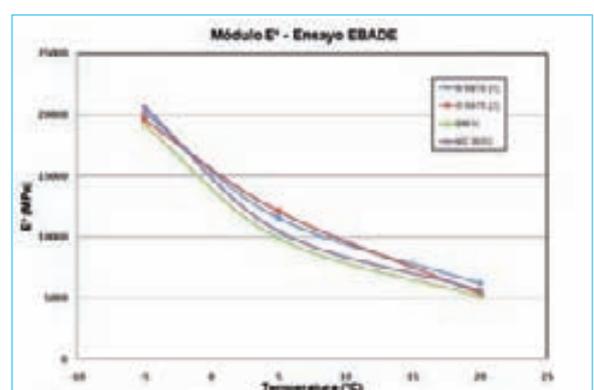


Figura 6. Variación del módulo inicial con la temperatura.

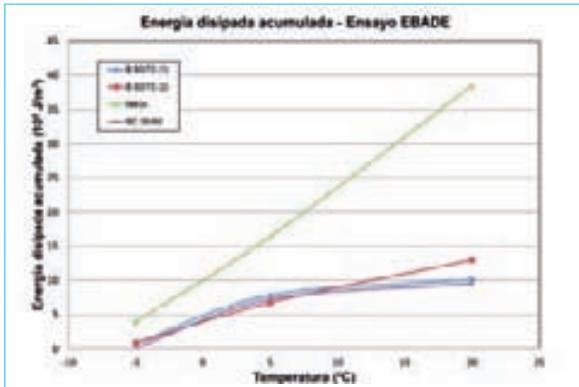


Figura 7. Variación de la densidad de energía disipada con la temperatura.

la deformación a tensión máxima en un amplio rango de temperaturas. De este modo es posible apreciar los cambios en las características de la mezcla fabricada con diferentes betunes.

Con el ensayo EBADE se puede obtener un conjunto de curvas de identidad, que muestran las diferencias en el comportamiento de las mezclas con la temperatura a través de la variación de la densidad de energía acumulada en función del módulo, Figura 9.

En este caso, las curvas confirman las conclusiones obtenidas al comparar la deformación de fallo con la deformación a tensión máxima, Figura 8, ya que la mezcla con BM3c disipa más energía para romper que las otras mezclas, sobre todo a 20°C y a 5°C, mientras que las otras mezclas tienden a comportarse del mismo modo.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos han permitido confirmar la utilidad del ensayo EBADE para evaluar el efecto de la temperatura sobre el comportamiento a fatiga de las mezclas bituminosas de una manera más sencilla que si se utilizan los ensayos convencionales a flexotracción.

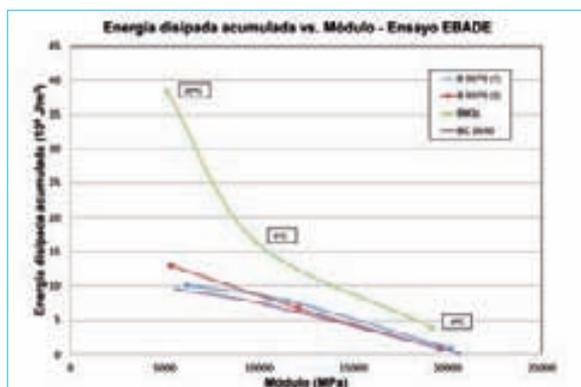


Figura 9. Variación de la densidad de energía disipada acumulada con el módulo.

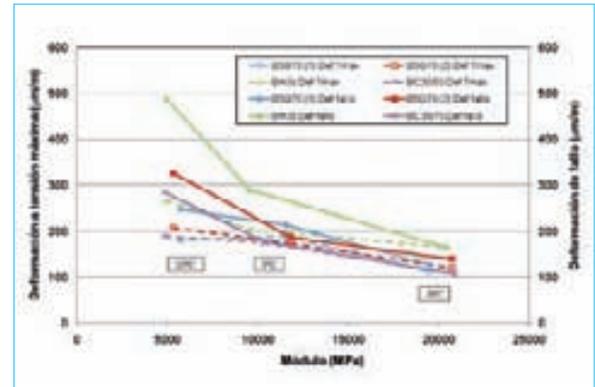


Figura 8. Deformación de fallo y deformación a tensión máxima vs módulo.

El ensayo EBADE permite obtener 2 parámetros que caracterizan el fallo por fatiga: el módulo y la diferencia entre la deformación de fallo y la deformación a tensión máxima en un amplio rango de temperaturas.

Con este ensayo también se puede obtener un conjunto de curvas de identidad, que muestran las diferencias en el comportamiento de las mezclas con la temperatura a través de la variación de la densidad de energía acumulada en función del módulo.

Para las mezclas analizadas en este estudio se ha observado que la mezcla elaborada con betún modificado con polímeros, BM3c, ha mostrado más ductilidad que las otras mezclas a lo largo de todo el rango de temperaturas (desde 20 a -5°C).

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Ministerio de Economía y Competitividad la ayuda recibida para la realización del Proyecto PROFIS (BIA2012-36508), en el marco del VI Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica, cofinanciado con fondos FEDER (Fondo Europeo de Desarrollo Regional) de la Unión Europea, así como a la empresa REPSOL por el suministro y caracterización de los betunes analizados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- I. Botella, R., Pérez-Jiménez, F., Miró, R. (2012). Application of a Strain Sweep Test to Assess Fatigue Behavior of Asphalt Binders. Construction and Building Materials, Vol. 36, p. 906-912.
- II. Di Benedetto H., de La Roche C., Bajaj H., Pronk A. Fatigue of Bituminous Mixtures: Different Approaches and RILEM Group Contribution. Sixth International RILEM Symposium

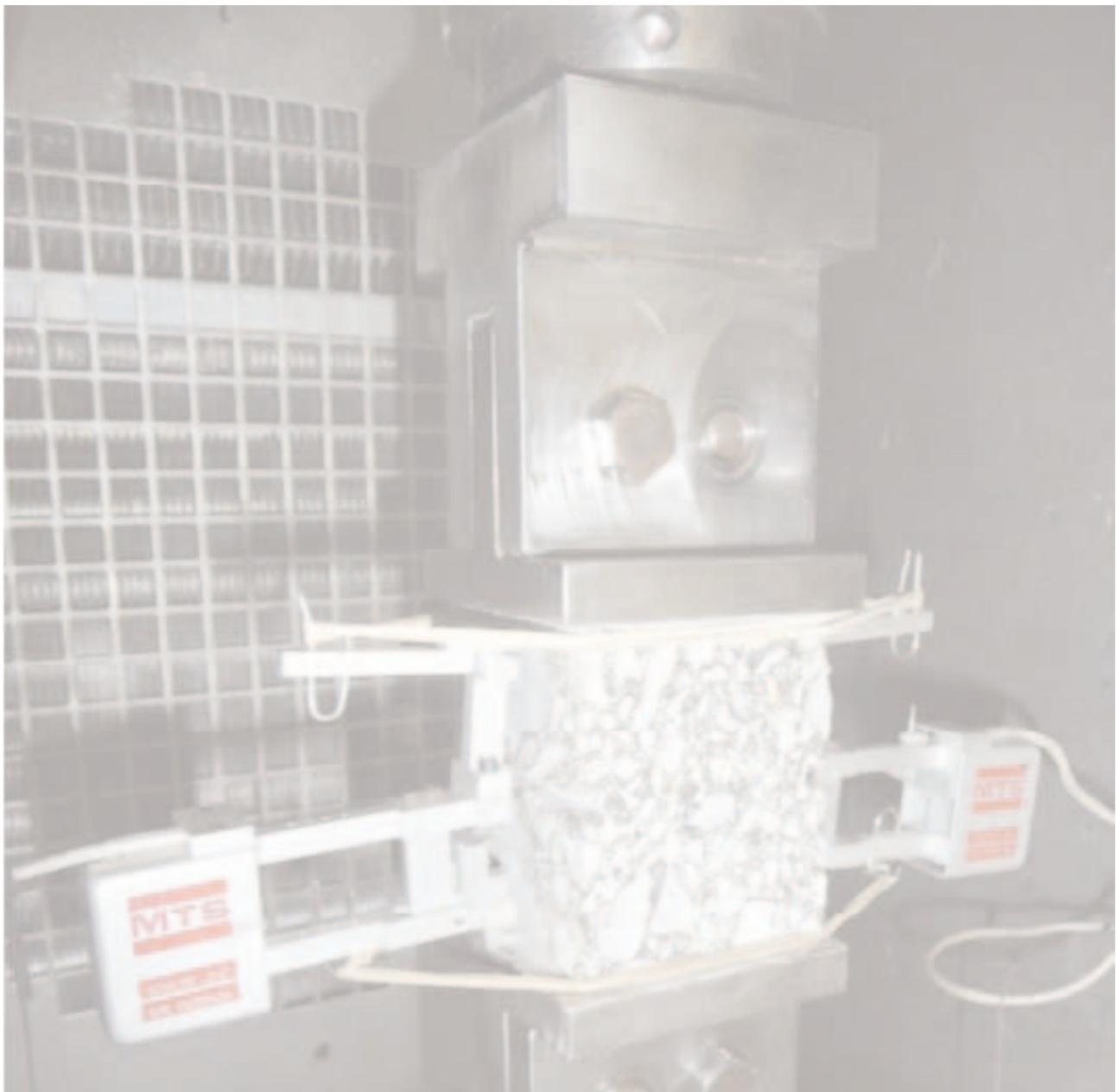
on Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials, Zurich, 14-16 de Abril de 2003.

III. Pérez-Jiménez, F.; Botella, R.; Miró, R.; Martínez, A. Estimating the Fatigue Law of Asphalt Mixtures Using a Strain Sweep Test (EBADE Test). 5th EATA Conference. Braunschweig, 3-5 de Junio de 2013.

IV. Pérez-Jiménez, F.; Botella, R.; Miró, R. (2012). Damage and Thixotropy in Asphalt Mixture and Binder Fatigue Tests. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. Volumen 2293, p. 8-17.

V. Pérez-Jiménez, F.; Valdés, G.; Botella, R.; Miró, R.; Martínez, A. (2011). EBADE procedure: A new method to asses fatigue behaviour of asphalt mixtures. Revista de la Construcción, 10, p. 455-465.

VI. Pérez-Jiménez, F.; Miró Recasens, R.; Martínez, A.; Botella, R.; Valdés, G. Evaluación del comportamiento a fatiga de las mezclas bituminosas mediante ensayos de fractura (FENIX) y cíclicos de barrido de deformaciones (EBADE). XVI Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, Rio de Janeiro, 20-25 de Noviembre de 2011. 



Mezclas templadas con emulsión bituminosa



Lucía MIRANDA PÉREZ
 Jacinto Luis GARCÍA SANTIAGO
 Nuria UGUET
 Daniel ANDALUZ
 M^a del Mar COLÁS VICTORIA
 Francisco José LUCAS
 Santiago GIL

ATEB
 Coordinador del Grupo Trabajo de Mezclas Templadas ATEB
 Presidenta ATEB
 Gerente ATEB
 Directora Técnica ATEB
 Coordinador del Área de Comunicación ATEB
 Coordinador Grupo de Seguridad de ATEB

RESUMEN

En la actualidad se puede decir que el 90% de los firmes de carreteras se ejecutan empleando mezclas bituminosas, entendiéndose como tales la combinación de áridos con un material bituminoso, dando lugar a un conglomerado, cuyo comportamiento permite tanto una estructura (cuando se habla de capas base e intermedias) y una rodadura que asegura unas prestaciones adecuadas a las solicitudes de tráfico en cada circunstancia.

El tipo de material bituminoso más utilizado corresponde a las mezclas bituminosas en caliente, seguido a continuación por las mezclas en frío.

Las mezclas en caliente, fabricadas a temperaturas superiores a los 150 °C, permiten la envuelta de los áridos y su puesta en obra. Esta versatilidad hace que su aplicación sea adecuada para cualquier tipo de tráfico y condiciones, limitando su actuación a un radio determinado por dependencia de las instalaciones de fabricación.

En cuanto a las mezclas en frío, más limitada su aplicación debido a la particularidad de la técnica, para la obtención de sus propiedades finales cuando termina su proceso de maduración, y la necesidad de requerir un tiempo de curado antes de la apertura del tráfico, también han limitado su aplicación. No obstante este tipo de mezclas tiene como ventaja su empleo a temperatura ambiente, lo que contribuye a mejorar los aspectos medioambientales dentro del proceso de construcción.

Recientemente, y teniendo en cuenta los aspectos positivos que ambos tipos de mezclas presentan, se ha manifestado en varios países, y sobre todo en España, un interés por un tipo de mezclas denominadas “mezclas templadas”, (denominadas en inglés como HWMA “half warm mix asphalt” y en francés como “enrobés semi-tièdés”), cuya característica principal consiste en ser un material bituminoso fabricado a una temperatura inferior a los 100 °C. Se convierte de esta forma en un tipo de material intermedio entre las mezclas en caliente y las mezclas en frío, permitiendo conseguir unas prestaciones semejantes a las mezclas en caliente y, por otro lado, aprovechando las ventajas medioambientales que proporcionan las mezclas en frío.

Son varias las técnicas que se han desarrollado para la fabricación de las mezclas templadas como la espuma de betún o las mezclas templadas con emulsión. Estas últimas son a las que se refiere este artículo.

Palabras clave: Mezclas templadas, Emulsión bituminosa

HISTORIA DE LAS MEZCLAS TEMPLADAS

Aunque el auge del desarrollo de las mezclas templadas se inició a principios del siglo XXI, promovida por las limitaciones en las emisiones según se exigía en el protocolo de Kyoto, ya hacía décadas que se utilizaba una técnica parecida, al fabricar mezclas en frío y existía problemas para la envuelta, cuando los áridos estaban sucios o eran de mala calidad, en donde se procedía a un ligero calentamiento de la emulsión para conseguir la cubrición de los áridos y con ello una homogeneidad en la mezcla.

España en el empleo de mezclas templadas con emulsión se puede decir que ha sido pionera. Las primeras aplicaciones comenzaron en los años 90 con el desarrollo de mezclas drenantes siguiendo con mezclas discontinuas, incorporando además material reciclado, llegando a fabricar mezclas templadas con tasas de hasta el 100% en planta.

En estas primeras experiencias realizadas, se ha comprobado que las mezclas templadas con emulsión permiten por un lado tomar las ventajas que presentan las mezclas en caliente en cuanto a su versatilidad para su aplicación para diferentes tipos de tráfico, incluyendo la posibilidad de proporcionar la misma capacidad portante, y por otro lado permite tomar de las mezclas en frío su contribución frente a las mejoras medioambientales así como de seguridad para los trabajadores, eliminando la desventaja de los tiempos de curado buscando la apertura inmediata del tráfico tras su puesta en obra.

Otra de las ventajas que también presentan las mezclas templadas es su capacidad para aumentar las distancias de transporte con respecto a una mezcla en caliente debido a su menor pérdida de temperatura durante el transporte^(v).

Todas estas ventajas hacen que las mezclas templadas se conviertan en la tecnología del futuro y por ello se considera necesaria la difusión y divulgación de las posibilidades que este tipo de mezclas pueden presentar para que puedan ser tenidas en cuenta por todos los participantes dentro del proceso de diseño y desarrollo de los firmes de carreteras: proyectistas, contratistas, fabricantes, administración, etc.

Hasta la actualidad todo este desarrollo se ha venido realizando siguiendo una serie de consignas y pasos que los fabricantes han ido documentando a través de sus experiencias, dado que no se dispone de normativa que acredite las actuaciones y el "savoir faire" de esta tecnología. Por ello en España, consciente de las ventajas de este tipo de mezclas y del interés que puede presentar dentro del sector de la construcción, ha comenzado una

labor documental de recopilación de las experiencias del empleo de este tipo de mezclas desarrollando una serie de documentos cuyo fin pretende ser una guía para su empleo. Estos documentos corresponden por un lado a unas "Recomendaciones para el empleo de mezclas templadas" desarrollado por la Agencia de Obras Públicas de la Junta de Andalucía, y por otro lado una Monografía sobre mezclas templadas con emulsión elaborada por ATEB^(v), en la que se describe todas las actividades y procesos que se encuentran implicados dentro del desarrollo de este tipo de mezclas desde los materiales, plantas de fabricación, control de calidad, puesta en obra.

CARACTERÍSTICAS DE LAS MEZCLAS TEMPLADAS

Como se ha indicado las mezclas templadas se caracterizan por ser una combinación de áridos con una emulsión bituminosa y fabricada a una temperatura inferior a los 100 °C. Todo el proceso se encuentra controlado y se hace necesaria la definición de unos protocolos para el adecuado control que permita asegurar unas condiciones de puesta en obra y unas prestaciones adecuadas para el uso previsto en función del tipo de tráfico.

Estos protocolos y seguimiento, desde el diseño hasta la puesta en obra, se realiza de una manera semejante y controlada al igual que se hace para el caso de las mezclas en caliente así como para las mezclas en frío, desde el estudio de los materiales, el diseño de la fórmula de trabajo, el proceso de fabricación y la puesta en obra.

1. Materiales

1.1. Áridos

Los materiales empleados en la fabricación de las mezclas templadas deberán cumplir con los requisitos solicitados para los diferentes tipos de mezclas bituminosas. En España la referencia para asegurar unas características a los materiales se encuentra publicada dentro del documento reglamentario correspondiente al Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares para la Construcción de Carreteras PG-03^(ix). En dicho documento, para el caso de los áridos, se recogen una serie de propiedades mecánicas que deben cumplir y para las cuales existen unas especificaciones concretas en función del tipo de tráfico, posición dentro de la estructura del firme, etc.

Las características principales a determinar para los áridos empleados en la fabricación de mezclas bituminosas son las siguientes:

- Dureza determinado a partir del ensayo de los Ángeles

REQUISITOS	C67BPF4 MBA
Índice de rotura	70 – 130
Tiempo de fluencia 4 mm a 40°C	10 – 45
Adhesividad	≥ 90
Contenido de ligante (por contenido de agua)	65 – 69
Residuo de tamizado @ 0,5 mm	≤ 0,1
Tendencia a la sedimentación	≤ 5

Tabla 1. Requisitos técnicos para la emulsión original a emplear en una mezcla templada abierta.

REQUISITO	CLASES SELECCIONADA DESPUÉS DE EVAPORACIÓN	CLASES SELECCIONADAS DESPUÉS DE EVAPORACIÓN ESTABILIZACIÓN ENVEJECIMIENTO
Penetración	≤ 330	DV
Punto de reblandecimiento	≥ 35	DV
Cohesión	≥ 0,5	DV
Recuperación elástica	≥ 40	TBR

Tabla 2. Requisitos técnicos para el ligante residual de la emulsión C67BPF4 MBA.

REQUISITOS	C65B4 MBC*	C65B5 MBC*
Índice de rotura	70 – 130	120 – 180
Tiempo de fluencia 4 mm a 40°C	10 – 45	10 – 45
Adhesividad	≥ 90	≥ 90
Contenido de ligante (por contenido de agua)	63 – 67	63 – 67
Residuo de tamizado @ 0,5 mm	≤ 0,1	≤ 0,1
Tendencia a la sedimentación	≤ 5	≤ 5

* Se elegirá el empleo de una de estas dos emulsiones en función del tipo de la curva granulométrica y de las condiciones de la ejecución

Tabla 3. Requisitos técnicos para la emulsión original a emplear en una mezcla templada cerrada.

- Coeficiente de Pulimento Acelerado sobre todo para los áridos a emplear en capa de rodadura
- Granulometría que dependerá del espesor de la capa y de las prestaciones exigidas a la mezcla
- Limpieza, característica importante para conseguir una buena adhesividad
- Equivalente de arena que permitirá comprobar la calidad de las arenas
- Composición mineralógica que condicionará el tipo de emulsión a emplear

1.2. Emulsiones bituminosas

Para el caso de la emulsión bituminosa los requerimientos reglamentarios son los definidos en la norma UNE-EN 13808 "Especificaciones para emulsiones bituminosas catiónicas"^(VII).

Además se dispone de un anexo nacional a la norma (UNE-EN 13808/1M) en donde se recoge explícitamente los tipos y características de las emulsiones bituminosas catiónicas más apropiadas en España para cada una de

las aplicaciones específicas. En dicho anexo se describen también las emulsiones a utilizar para la fabricación de mezclas templadas, en función de la granulometría de la mezcla a fabricar y del empleo de material fresado para el caso de los reciclados templados. Las tablas 1 a 6 recogen los requisitos seleccionados para las emulsiones a emplear en cada tipo de mezclas templadas, tanto en lo que se refiere a la emulsión original como a su residuo.

La tecnología sobre el diseño de emulsiones bituminosas, tanto en lo que se refiere a los ligantes como a los emulsionantes a emplear (tipo y dosificación a emplear), permite un amplio abanico de posibilidades para poder adaptar el empleo de un tipo de árido con una emulsión específica y conseguir una mezcla templada final con unas prestaciones semejantes a las que proporciona las mezclas bituminosas en caliente.

1.3. Material Recuperado de Mezclas Bituminosas (MRMB)

El material recuperado de mezclas bituminosas se puede considerar como uno de los componentes de las mezclas templadas, dado que la versatilidad de este tipo de mezclas, permite su incorporación en algunos casos, con dosificaciones que van desde tasas medias para porcentajes del 20-50 %, alta tasa para porcentajes entre el 50-80 % y tasa total mayores del 80%.

Es importante disponer de un material recuperado de buena calidad y con una granulometría que permita su adaptación dentro del huso previsto para la mezcla a dosificar. La aportación del ligante en forma de emulsión permitirá el rejuvenecimiento del ligante envejecido del material recuperado.

2. Fórmula de trabajo

Uno de los aspectos fundamentales para el desarrollo de las mezclas templadas consiste en definir una metodología de diseño que permita obtener la fórmula de trabajo que posteriormente pueda ser empleada en la planta de fabricación.

Según la experiencia desarrollada en España con las mezclas templadas, para la obtención de la fórmula de trabajo, previamente en el laboratorio, es importante definir algunos aspectos entre los que se encuentran:

- El proceso y tiempo de mezclado de los componentes para conseguir una envuelta homogénea y completa de la mezcla así como un tiempo suficiente de manejabilidad que permita su fabricación, transporte y puesta en obra
- Asegurar un valor de humedad óptima que permita la puesta en obra pero que quede eliminada una vez finalizado el proceso de compactación. Este parámetro se consigue con un control riguroso de las temperaturas de calentamiento de todos los componentes de la mezcla (áridos y emulsión) así como del control de la humedad final de la mezcla durante todo el proceso de fabricación.

En la actualidad no se dispone de una normativa específica para la caracterización de este tipo de mezclas por lo que todos los trabajos se están desarrollando utilizando la normativa de las mezclas bituminosas en caliente según la serie de normas EN 12697.

Lógicamente las mezclas templadas presentan unas características específicas que no contemplan las mezclas en caliente por lo que se está procediendo a la adaptación de algunos aspectos dentro de los métodos de ensayo utilizados.

Para la caracterización de las mezclas bituminosas templadas se tienen en cuenta los mismos parámetros que en el caso de las mezclas en caliente, para los diferentes tipos, y que corresponden en general a:

- La composición de la mezcla a través de la determinación del contenido de ligante y su granulometría
- Comportamiento frente al agua mediante el ensayo de sensibilidad al agua
- Contenido de huecos

REQUISITO	CLASES SELECCIONADA DESPUÉS DE EVAPORACIÓN	CLASES SELECCIONADAS DESPUÉS DE EVAPORACIÓN ESTABILIZACIÓN ENVEJECIMIENTO
Penetración	≤ 100 *	DV
Punto de reblandecimiento	≥ 43 *	DV

*La clase relativa a la consistencia del ligante residual dependerá del tipo de mezcla a fabricar, climatología y categoría de tráfico de la carretera. Podrá elegirse la más idónea en cada caso entre las clases 2,3 y 4.

Tabla 4. Requisitos técnicos para el ligante residual de la emulsión C65B4 y C65B5 MBC.

REQUISITOS	C60B7 REC*	C60B6 REC*
Índice de rotura	≥ 220	170 – 230
Tiempo de fluencia 2 mm a 40°C	10–45**	10–45 **
Adhesividad	≥ 90 %	≥ 90 %
Contenido de ligante	58 – 62	58 – 62
Residuo de tamizado @ 0,5 mm	≤ 0,1	≤ 0,1
Tendencia a la sedimentación	≤ 10	≤ 10

* Se elegirá el empleo de una de estas dos emulsiones en función del tipo de material a reciclar y de las condiciones de la ejecución.

** Se podrán emplear emulsiones con Tiempo de fluencia (35-80 s), cuando se considere necesario

Tabla 5. Requisitos técnicos para la emulsión original a emplear en una mezcla templada reciclada.

REQUISITO	CLASES SELECCIONADA DESPUÉS DE EVAPORACIÓN	CLASES SELECCIONADAS DESPUÉS DE EVAPORACIÓN ESTABILIZACIÓN ENVEJECIMIENTO
Penetración	≤ 150	DV
Punto de reblandecimiento	≥ 43	DV

Tabla 6. Requisitos técnicos para el ligante residual de la emulsión C60B7 REC y C60B6 REC.

- Resistencia frente a las deformaciones
- En este proceso de caracterización se están teniendo en cuenta una serie de puntualizaciones como son:
 - El empleo de la compactación giratoria para la fabricación de probetas
 - Definir unos tiempos de curado sobre las probetas previamente a la ejecución de los ensayos

Para ambos casos lo que se pretende es evitar la interferencia de la humedad presente en el mezcla posteriormente en la realización de los ensayos de caracterización.

3. Plantas de fabricación

Las mezclas bituminosas templadas pueden fabricarse tanto en centrales diseñadas específicamente, como en



Figura 1. Planta móvil adaptada para la fabricación de mezclas templadas con emulsión.

centrales de fabricación de mezclas en caliente realizan pequeñas modificaciones como por ejemplo acoplar el instrumental adecuado para la incorporación de material recuperado de mezclas bituminosas.

En la fabricación de mezclas templadas la temperatura de la mezcla implica un calentamiento de los áridos a temperaturas inferiores a las normales de mezcla en caliente. Ello se logra de dos formas, bien calentando directamente los áridos a la temperatura final deseada (no superior a los 100°C) en cuyo caso hay que comprobar la capacidad del quemador y asegurar una combustión adecuada, para evitar desajustes o bien usando plantas de reciclado en caliente basadas en el principio de transferencia de calor de una parte de los áridos sobrecalentados a otra fracción de los áridos, incorporada en frío, de modo que tras su mezcla se obtenga la temperatura deseada y se pueda añadir la emulsión. Otro de los puntos a controlar corresponde al filler que queda en la mezcla y que no es eliminado por aspiración durante el proceso de calentamiento dado el secado incompleto de los áridos. Esta particularidad deberá ser estudiada durante el estudio de la fórmula de trabajo en el laboratorio.

Las plantas disponen de tolvas para el almacenamiento y dosificación en los tamaños necesarios, incluida una para el material recuperado de mezclas bituminosas dosificadas a través de sistemas de control automatizado.

La emulsión, cuando se utilicen centrales de fabricación de mezcla en caliente, se incorporará al mezclador empleando conducciones diferenciadas del ligante para evitar problemas dentro de la instalación. Su dosificación se realizará a través de caudalímetros que aseguren la proporción adecuada y definida en la fórmula de trabajo.

Para el caso de mezclas templadas en las que se incorpore material recuperado de mezclas bituminosas, las plantas dispondrán de un sistema de dosificación y calentamiento de este material adecuado en



Figura 2. Planta de fabricación de mezclas recicladas con tambor secador de flujo paralelo y anillos para la introducción del MRMB.

función de la tasa a incorporar. Salvo en los casos de tasa total, son muy adecuadas las plantas de reciclado en caliente basadas en el principio de transferencia de calor de los áridos vírgenes sobrecalentados al MRMB. En el caso de tasa total o muy alta, lo apropiado es utilizar sistemas directos de aportación de calor pero sin que afecte al ligante como por ejemplo los sistemas de tambor secador de flujo paralelo. En ese caso, no serían adecuados los sistemas de calentamiento del material recuperado con excesiva exposición al calor, como sería el caso de los tambores secadores convencionales de contraflujo, habituales en las plantas discontinuas que provocaría una degradación excesiva del ligante.

4. Transporte y puesta en obra de mezclas templadas

El transporte de las mezclas templadas se realiza empleando los mismos camiones que para las mezclas en caliente provistos de lona que cubra y proteja la mezcla.

Sobre el transporte es importante destacar que este tipo de mezclas permite una prolongación de las distancias desde la planta de fabricación hasta la obra por la menor diferencia de temperatura.

La puesta en obra se realiza con el mismo equipamiento que el utilizado para las mezclas en caliente, sobre la que se ha aplicado un riego con emulsión.

El equipo de extendido estará formado por máquina extendedora con posibilidad de acoplar sistemas de alta compactación para poder aprovechar al máximo la temperatura de la mezcla para su correcta compactación.

El proceso de compactación se realiza de manera inmediata al extendido de la mezcla y contará por un equipo compuesto de rodillos metálicos provistos de sistema de vibración y compactadores neumáticos. La actuación de estos equipos se llevará a cabo hasta conseguir alcanzar la densidad fijada en el tramo de prueba previo realizado.



Figura 3. Proceso de compactación y aspecto de una mezcla templada con emulsión.

5. Control de calidad

Es uno de los aspectos más importantes ya que permite asegurar que el proceso se lleva a cabo de manera controlada para asegurar tanto la repetibilidad como la reproducibilidad de todo el proceso. Por ello en los trabajos es importante elaborar un plan de calidad definiendo tanto los parámetros a caracterizar así como la comprobación de que se cumplen todos los puntos definidos en las actividades previas de formulación de la mezcla y fabricación.

Lo más destacado para asegurar un adecuado control sobre las mezclas templadas es conseguir una buena toma de muestra, representativa de todo el conjunto, que debe ser ensayada en las mismas condiciones que se encontraba durante la fabricación y la puesta en obra, por ello es importante definir una metodología de toma de muestra y almacenamiento y transporte de la misma hasta su llegada al laboratorio para su caracterización.

Este protocolo deberá definir las condiciones de almacenamiento utilizando recipientes estancos y cerrados para evitar la pérdida de la humedad original de la mezcla.

Otro de los puntos a tener en cuenta son las condiciones de calentamiento y temperatura máxima de calentamiento de la mezcla para su preparación antes de la caracterización. Un aporte de calor por encima de los 100 °C hace que la muestra no sea representativa con respecto al estado en el que se encontraba durante su puesta en obra y por tanto distorsionaría el resultado final de las características de la mezcla.

TIPOS DE MEZCLAS TEMPLADAS Y CAMPOS DE APLICACIÓN

Los tipos de mezclas templadas se asocian con los posibles campos de aplicación adaptando en cada caso la granulometría así como el tipo de emulsión más apropiada para conseguir las mejores prestaciones.

Las mezclas templadas pioneras corresponden a las abiertas, surgidas como alternativa a las mezclas

abiertas en frío, eliminando de esta forma los tiempos de curado para la apertura al tráfico. Este tipo de mezclas proporcionan una buena flexibilidad lo que permite su empleo en

pavimentos con bases deformables. También puede ser adecuada su aplicación como capa intermedia en firmes de nueva construcción así como aplicación en operaciones de bacheos y reposiciones en las que sea necesario realizar operaciones de fresado.

Las mezclas drenantes y discontinuas que se conocen proporcionan unas propiedades características en cuanto a seguridad, evitando el agua planning, así como confort a la rodadura. Ambas mezclas muy conocidas dentro de las mezclas en caliente, pueden ser formuladas en forma de mezclas templadas proporcionando además de las prestaciones indicadas, un comportamiento más flexible por un menor envejecimiento del ligante al no estar sometido a temperaturas elevadas.

De todos los tipos de mezclas las más comúnmente utilizadas son las mezclas en caliente convencionales, aplicables en cualquiera de las capas del firme. Igualmente las mezclas templadas pueden ser formuladas como estas mezclas tanto con granulometría densa, semidensa o gruesa, aplicable para todos los tipos de tráfico.

Finalmente indicar que cualquiera de los tipos de mezclas templadas puede ser fabricada utilizando material reciclado procedente de mezcla bituminosa en diferentes porcentajes según el tipo de capa donde se aplique así como las recomendaciones o requisitos reglamentarios que se apliquen. En cualquier caso los diferentes tipos de mezclas templadas podrían ser fabricadas incorporando material reciclado en diferentes tasas. Solamente en este caso será necesario cuidar la granulometría del material recuperado de mezcla bituminosa para asegurar la granulometría establecida en cada caso.

CONCLUSIONES

Las mezclas templadas con emulsión son una alternativa eficiente dentro del proceso de fabricación de mezclas bituminosas que presenta un comportamiento mecánico



Figura 4. Recipientes para el almacenamiento y acondicionamiento de las muestras de mezclas templadas tomadas en obra para su posterior control de calidad.

y unas prestaciones semejantes para el mismo tipo de mezcla fabricada en caliente.

Las ventajas que presentan es una importante contribución frente a aspectos medioambientales por su empleo a temperaturas inferiores a los 100 °C, permitiendo una reducción en el consumo de combustibles fósiles y por tanto disminuyendo las emisiones a la atmósfera de gases de efecto invernadero. Esta contribución se aumenta con la posibilidad de utilizar material reciclado de mezclas bituminosas que permite reducir la explotación de áridos vírgenes para ser empleados en la fabricación de las mezclas.

También es importante tener en cuenta la posibilidad de aumentar la distancia de transporte siendo una ventaja para obras localizadas retiradas de la central de fabricación.

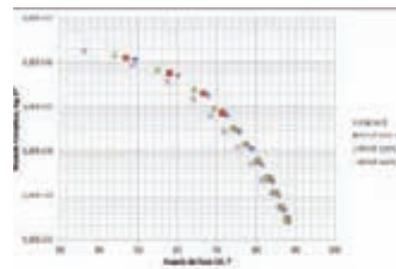
Finalmente otro aspecto importante consiste en mejorar las condiciones de trabajo del personal que ejecuta las obras evitando riesgos de quemaduras por las temperaturas reducidas así como mejorando el confort durante el desarrollo de la actividad sobre todo en zonas de elevadas temperaturas.

Todas estas ventajas son importantes y ventajosas pero no serían posibles sin un adecuado control de todos los procesos que forman parte del desarrollo de las mezclas templadas, por ello se hace imprescindible establecer metodologías de trabajo en todos los aspectos desde el diseño de la mezcla hasta la definición de los métodos de ensayo como el control de calidad sin olvidar las etapas de fabricación, extendido y puesta en obra.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- I. Influencia de la temperatura en las propiedades mecánicas del reciclado en frío con emulsión bituminosa. F. Guisado, J.L. Santiago, A. Páez, M. Ayala. CILA 2011, Revista Asfalto y Pavimentación nº1 y VI Jornada Nacional Asefma. Año 2011.
- II. Innovaciones en tecnología en frío. J. A. Soto. Ateb.
- III. Mezclas Templadas Abiertas, Porosas y Discontinuas. J.L. Pradas, F.J.Lucas, J. Fraga, A. Pérez, Vyodeal XXI Vyodeal, Año 2011
- IV. Mezclas bituminosas a baja temperatura: mezclas en frío, templadas y semicalientes. A. Bardesi, J.A. Soto. Revista Carreteras Número 169. Año 2010
- V. Monografías ATEB: Las emulsiones de betún. Su química y su física, Mezclas abiertas en frío y Reciclados en frío.
- VI. Panorámica general de mezclas a baja temperatura. Reciclado templado con emulsión bituminosa J.A. Soto, M.M Colas, Jornada Técnica Mezclas Bituminosas Adaptadas al Cambio Climático, Valladolid 2010
- VII. Mezclas bituminosas templadas F.J. Lucas, S. Torres, Jornada Técnica Mezclas Bituminosas Adaptadas al Cambio Climático, Valladolid 2010
- VIII. Normativa sobre emulsiones bituminosas (UNE-EN 13808 y anexo nacional UNE-EN 13808/1M)
- IX. Pliego Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes (PG3): Art. 542, 543. Pliego Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes (PG4).
- X. Reciclados con ligantes bituminosos. Comparación entre reciclar en frío, in situ, semicaliente y caliente. J. A. Soto. VII Congreso Nacional de Firmes. Año 2006.
- XI. Reciclado Total de Mezclas Bituminosas a Bajas Temperaturas. Una propuesta para su diseño, caracterización y producción. J.L. Santiago, F. Guisado, E. Moreno y A. Paéz. VI Jornada Nacional Asefma 2011
- XII. Recomendaciones para la redacción de: Pliegos de especificaciones técnicas para el uso de mezclas bituminosas a bajas temperaturas. AOPJA. Año 2012
- XIII. Rehabilitación sostenible de pavimentos: innovaciones en tecnología y desarrollos de mezclas para aprovechamiento total de materiales con bajo consumo de energía. J.L. Santiago. F. Guisado. VI Congreso Nacional de la Ingeniería Civil. Valencia. Año 2011.
- XIV. XV CILA. Fabricación y puesta en obra de un reciclado templado con emulsión bituminosa. A. García, J.A. Soto. Año 2010. 

Cambios Físicoquímicos en los ligantes empleados en mezclas asfálticas de baja temperatura



Francisco José BARCELÓ MARTÍNEZ
Antonio PÁEZ DUEÑAS

Centro de Tecnología de Repsol
Centro de Tecnología de Repsol

RESUMEN

Las técnicas que permiten reducir la temperatura de trabajo de las mezclas asfálticas han demostrado ser muy eficaces desde el punto de vista técnico y medioambiental. En los últimos años se han llevado a cabo en España, diversas pruebas de puesta en obra de mezclas de baja temperatura, con resultados muy satisfactorios en los ahorros energéticos producidos y disminución de emisiones asociadas, y además con unas propiedades finales alcanzadas en la mezcla que hacen a estas técnicas aplicables en la mayoría de los firmes.

Sin embargo los estudios realizados sobre los diferentes cambios físicoquímicos que sufre el betún asfáltico como consecuencia del empleo de una menor temperatura de trabajo son muy limitados. Los ligantes asfálticos, debido a su naturaleza hidrocarbonada, evolucionan de manera diferente en función de la temperatura a la que estén sometidos, ya que la cinética del proceso de oxidación depende directamente de ese parámetro.

Para abordar el estudio de como afectan las diferentes temperaturas de trabajo de una mezcla asfáltica a las propiedades del ligante, se ha realizado una caracterización físicoquímica, de un betún sometido a diferentes temperaturas en el ensayo RTFOT, que equivalen a las típicas temperaturas empleadas en las mezclas calientes, semicalientes y templadas. Posteriormente los residuos obtenidos en el RTFOT se han sometido al ensayo PAV y se han caracterizado de igual manera. De esta forma se ha conseguido obtener datos sobre la evolución de la composición química, propiedades físicas y reológicas de los ligantes asfálticos, durante las etapas de envejecimiento a corto y largo plazo, en función de la temperatura a la que se han procesado las mezclas asfálticas.

Los resultados obtenidos en este estudio pueden ayudar a entender mejor el comportamiento de las mezclas asfálticas cuando se trabajan a menor temperatura, y como pueden evolucionar posteriormente, una vez colocadas en el firme.

Palabras clave: Pavimentos, Ligantes, Mezclas asfálticas, Betún

INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha producido un gran auge, en el sector de la carretera, de técnicas encaminadas a reducir la temperatura de trabajo de las mezclas asfálticas, como una respuesta a la necesidad de mejorar la sostenibilidad del proceso de construcción de la carretera. Esto ha dado lugar a la aparición de diversas publicaciones sobre obras realizadas con estas técnicas, en las que se detallan los datos de reducción de consumo en combustible conseguidos, la disminución de emisiones asociadas, además de las propiedades mecánicas alcanzadas en la mezcla.

Sin embargo no existe mucha literatura que trate sobre los distintos cambios fisicoquímicos que pueden sufrir los ligantes asfálticos como consecuencia de emplear una menor temperatura de trabajo. Teniendo en cuenta que los betunes son productos de naturaleza orgánica, se van a oxidar en mayor o menor medida en función de la temperatura empleada en la planta fabricación, y esto puede dar lugar a distintas propiedades finales en la mezcla asfáltica.

Para el estudio de esta variación de propiedades en el ligante, como consecuencia de una menor temperatura de trabajo, se han aplicado diversas técnicas de caracterización química (Espectroscopia Infrarroja, fraccionamiento) y reológica sobre los ligantes obtenidos en los ensayos RTFOT y PAV. Estos ensayos se han aplicado sobre los ligantes para simular en el laboratorio la oxidación a corto y largo plazo, a diferentes temperaturas, correspondientes en la práctica a las mezclas calientes, semicalientes, templadas y en frío.

ROLLING THIN FILM OVEN TEST (RTFOT)

El ensayo RTFOT, realizado según UNE EN 12607-1, simula en laboratorio el envejecimiento que sufre el ligante bituminoso durante el proceso de mezcla en una planta de aglomerado asfáltico, también llamado envejecimiento a corto plazo (short term aging). Este ensayo se lleva a cabo a 163°C, que es una temperatura cercana a la que se utiliza en planta para la fabricación de las mezclas en caliente. Para simular el envejecimiento del ligante cuando se trabaja a temperaturas en la zona de las llamadas mezclas semicalientes o de las mezclas templadas, se ha variado la temperatura de ensayo en el RTFOT, tomando 125°C para simular la mezcla semicaliente y 85°C para la templada.

No se han variado los demás parámetros de ensayo, como caudal de aire, masa de ligante y tiempo, si bien, para garantizar una misma película de ligante en el recipiente de ensayo en todos los casos, se han precalentado las muestras a 163°C en atmosfera de nitrógeno, dentro de los recipientes, mientras giraban en la estufa RTFOT, durante 10 minutos. De esta manera se tiene el mismo área de contacto ligante-aire en todos los ensayos, aunque debido a la diferencia de viscosidad en los ligantes por la distinta temperatura del ensayo, la renovación del área de contacto no será igual en todos los casos.

PAV

Este ensayo simula en laboratorio el envejecimiento del ligante una vez que se encuentra en servicio, denominado envejecimiento a largo plazo (long term aging), utilizando para ello la combinación de alta temperatura (100°C) y presión (2,1 MPa), de acuerdo con la norma UNE EN 14769.

Todos los residuos obtenidos en los tres ensayos RTFOT realizados, a las tres temperaturas comentadas anteriormente, más el betún original, se han sometido al ensayo PAV, y ensayado posteriormente de igual forma.

Así pues se dispone de los siguientes 8 ligantes:

Betún Original A	RTFOT 85°C B	RTFOT 125°C C	RTFOT 163°C D
PAV de betún original A	PAV de residuo RTFOT a 85°C	PAV de residuo RTFOT a 125°C	PAV de residuo RTFOT a 163°C

PROPIEDADES FÍSICAS

Los resultados de los ensayos en la caracterización de propiedades físicas de los ligantes obtenidos a diferentes temperaturas en el RTFOT así como de los residuos PAV, se muestran en la Tabla 1.

Se puede observar como al aumentar la temperatura en el ensayo RTFOT, el betún endurece, aumenta su viscosidad y tiene lugar una mayor pérdida de masa. En el ensayo PAV, sin embargo, los residuos A, B y C son muy similares, siendo el D el más evolucionado, el valor de Fraas muestra una evolución de la fragilidad con la temperatura de ensayo RTFOT.

ENSAYO	UNIDADES	BETÚN ORIGINAL A	RTFOT 85°C B	RTFOT 125°C C	RTFOT 163°C D
Penetración, 25°C	0,1 mm	58	50	43	37
Punto de Reblandecimiento	°C	50,0	52,2	53,4	57,6
IP		-0,83	-0,64	-0,71	-0,13
Fraas	°C	-13	-12	-12	-10
Viscosidad 135°C	mPa.s	493	553	578	813
Variación de Masa	%	---	0,01	0,016	0,024

		PAV A	PAV B	PAV C	PAV D
Penetración	0,1 mm	23	23	23	21
Aumento en Penetración	0,1mm	35	27	20	16
Punto de Reblandecimiento	°C	65,6	66,2	66,2	69,6
Aumento de Punto de Reblandecimiento	°C	15,6	14	12,8	12
IP		0,37	0,47	0,47	0,85
Fraas	°C	-12	-11	-8	-6
Viscosidad 135°C	mPa.s	1312	1385	1405	1840
Aumento en Viscosidad	mPa.s	819	832	827	1027

Tabla 1. Propiedades físicas

COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS LIGANTES

La composición química de los ligantes asfálticos es bastante compleja, por lo que se han desarrollado métodos de separación de los mismos basados en la agrupación por familias de compuestos químicos que presentan características similares.

Uno de los métodos más empleados en la actualidad, fue desarrollado por Corbett en 1969⁽¹⁾, y posteriormente, modificado y adoptado como norma ASTM (ASTM 4124)⁽¹⁾. Este método fracciona el betún en cuatro familias denominadas, asfaltenos, saturados, polar-aromáticos (llamados comúnmente resinas) y nafteno-aromáticos (aromáticos), atendiendo a su diferente solubilidad en disolventes orgánicos. En concreto, la familia de asfaltenos se obtiene por precipitación con n-heptano, mientras que el resto de componentes, solubles en este disolvente y denominados maltenos, se separan mediante un proceso de adsorción-desorción llevado a cabo en una columna cromatográfica de alúmina, mediante la utilización de disolventes de polaridad creciente, como n-heptano, tolueno, tolueno-metanol y tricloroetileno, según el esquema de la Figura 1.

La composición química de los ligantes es un parámetro importante a tener en cuenta en el estudio que se está



Figura 1.

	UNIDADES	BETÚN ORIGINAL A	RTFOT 85°C B	RTFOT 125°C C	RTFOT 163°C D
ASFALTENOS	%	17,7	17,2	17,2	18,4
SATURADOS	%	8,0	8,5	9,7	9,7
POLAR AROMÁTICOS	%	31,5	31,3	28,6	27,8
NAFTENO AROMÁTICOS	%	42,8	43,0	44,5	44,1
IC		0,34	0,34	0,36	0,39
		PAV A	PAV B	PAV C	PAV D
ASFALTENOS	%	22,7	23,7	24,3	23,3
SATURADOS	%	9,0	8,5	7,7	8,1
POLAR AROMÁTICOS	%	34,7	35,1	35,1	34,7
NAFTENO AROMÁTICOS	%	33,6	32,7	32,9	33,9
IC		0,46	0,47	0,47	0,46

Tabla 2. fraccionamiento según ASTM 4124

llevando a cabo, ya que el efecto de la temperatura puede modificar la distribución por familias del ligante en gran medida.

Los estudios realizados⁽ⁱⁱⁱ⁾ hasta el momento, establecen una evolución de los componentes del betún, propiciada por el envejecimiento, según la siguiente tendencia:

Aromáticos → Resinas → Asfaltenos

Esta evolución se puede ver afectada por la temperatura de trabajo del ligante durante las etapas de mezcla con áridos y extendido. Los datos obtenidos en el fraccionamiento de los ligantes sometidos a RTFOT y PAV se presentan en la Tabla 2.

El cálculo del índice de inestabilidad coloidal (índice Gaestel, Ic) también proporciona información sobre el estado coloidal del ligante (sol o gel), como consecuencia del envejecimiento. Cuanto más elevado sea este índice, mayor es el carácter Gel del ligante, y es menos estable coloidalmente. El índice Gaestel se define como la relación de la suma de las fracciones de Asfaltenos y Saturados entre la suma de Resinas y Aromáticos.

$$IC = (\text{Asfaltenos} + \text{Saturados}) / (\text{Resinas} + \text{Aromáticos})$$

En el RTFOT se puede observar como el valor de Ic aumenta según aumenta la temperatura de ensayo, como consecuencia fundamentalmente del aumento

en la fracción de Asfaltenos y disminución de Polar aromáticos.

Sin embargo en el ensayo PAV de los residuos obtenidos por RTFOT, los valores de IC se igualan, ya que no hay diferencias muy significativas en los porcentajes de cada fracción, más allá de los posibles errores experimentales del método, no influyendo por tanto en este caso, la diferente temperatura empleada en

el ensayo RTFOT en la composición final del ligante.

ESPECTROSCOPIA INFRARROJA (IR)

Esta técnica espectroscópica es muy utilizada para determinar grupos funcionales en compuestos orgánicos, como el betún asfáltico. Concretamente los grupos denominados carbonilo (C=O) y sulfóxido (S=O), son interesantes para conocer la evolución oxidativa de los ligantes, ya que ambos grupos aumentan en número, en función del grado de envejecimiento de estos ligantes.

Los grupos carbonilos aparecen en el espectro en el intervalo de frecuencias comprendido entre 1653 - 1752 cm⁻¹, formando parte de ácidos carboxílicos, cetonas y anhídridos. Mientras que los grupos sulfóxido presentan un pico de absorción a 1030 cm⁻¹, y se generan debido a la oxidación de átomos de azufre (Figura 2).

Basadas en las áreas de estos dos picos se han definido dos índices estructurales^(iv):

$$\text{Índice Carbonilo} = A_{1700} / \Sigma A$$

$$\text{Índice Sulfoxido} = A_{1030} / \Sigma A$$

Donde ΣA representa la suma de áreas del espectro infrarrojo, comprendidas entre las frecuencias de 2000 and 600 cm⁻¹.

El ensayo RTFOT produce una leve subida de ambos índices con la temperatura, siendo algo más acusado en el índice carbonilo. En el ensayo PAV los incrementos en ambos índices son mucho mayores, lo que indica que es un ensayo más severo y produce una mayor oxidación en el ligante^(V). Es importante destacar que estos índices han sido capaces de dar lugar a diferencias en los residuos de PAV, cosa que no se ha visto tan claro en la composición por fracciones.

Otro hecho destacable es que el envejecimiento a corto plazo prácticamente no produce oxidación en los átomos de azufre, cosa que si ha ocurrido en el de largo plazo, donde se han formado grupos sulfóxidos de forma apreciable.

CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA

La caracterización reológica de los ligantes asfálticos nos permite observar diferencias en su comportamiento como consecuencia del distinto grado de envejecimiento al que se les ha sometido. Algunos parámetros reológicos, como módulo complejo (G^*) y ángulo de fase (δ), pueden variar como consecuencia de la diferente temperatura empleada en el proceso de mezcla de los ligantes.

Los Diagramas de Black, donde se representa el módulo complejo (escala logarítmica), frente al ángulo de fase, de los ligantes obtenidos tras RTFOT y de los obtenidos por PAV, tienen el siguiente aspecto.

En los ligantes obtenidos tras RTFOT, el procedente del ensayo a 163°C presenta claramente

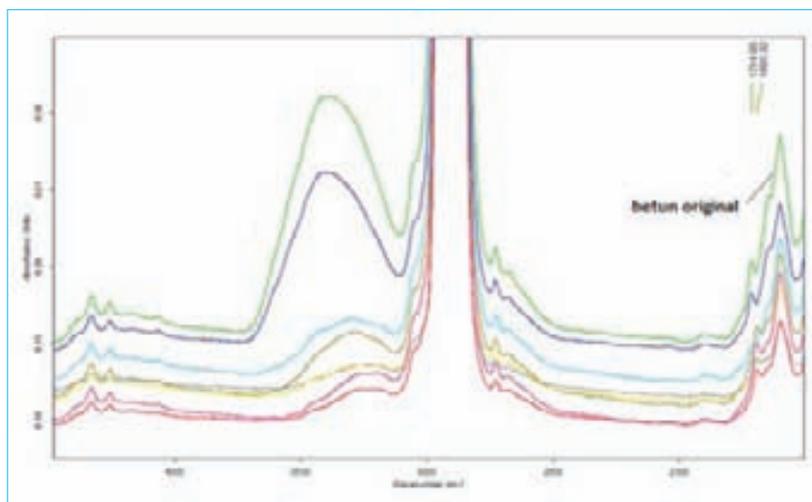


Figura 2. Espectro infrarrojo de los ligantes

una mayor rigidez, habiendo una disminución de valores de ángulo de fase, a igual módulo complejo, para los residuos RTFOT obtenidos a menor temperatura.

En cuanto a los residuos PAV, los cuatro tienen un comportamiento reológico muy similar, parece que el envejecimiento a largo plazo realizado con este método ha igualado las propiedades de los ligantes original y RTFOT. Desde un punto de vista práctico,

	GRUPO	BETÓN ORIGINAL A	RTFOT 85°C B	RTFOT 125°C C	RTFOT 163°C D
$A_{1700} \text{ cm}^{-1}$	C=O	0,382	0,588	0,980	0,164
$A_{1030} \text{ cm}^{-1}$	S=O	0,304	0,414	0,429	0,472
ΣA		179,294	243,339	165,326	142,081
Índice Carbonilo		0,21	0,24	0,26	0,33
Índice Sulfóxido		0,17	0,17	0,18	0,19
Aumento Índice Carbonilo ¹ , %		0	14	24	57
Aumento Índice Sulfóxido ¹ , %		0	0	6	12
		PAV A	PAV B	PAV C	PAV D
$A_{1700} \text{ cm}^{-1}$	C=O	0,768	0,539	0,721	1,062
$A_{1030} \text{ cm}^{-1}$	S=O	0,588	0,392	0,510	0,709
ΣA		162,187	87,384	121,655	161,161
Índice Carbonilo		0,47	0,61	0,60	0,66
Índice Sulfóxido		0,36	0,38	0,42	0,44
Aumento Índice Carbonilo ¹ , %		124	190	186	214
Aumento Índice Sulfóxido ¹ , %		112	123	147	159

Tabla 3. Resultados espectrograma IR

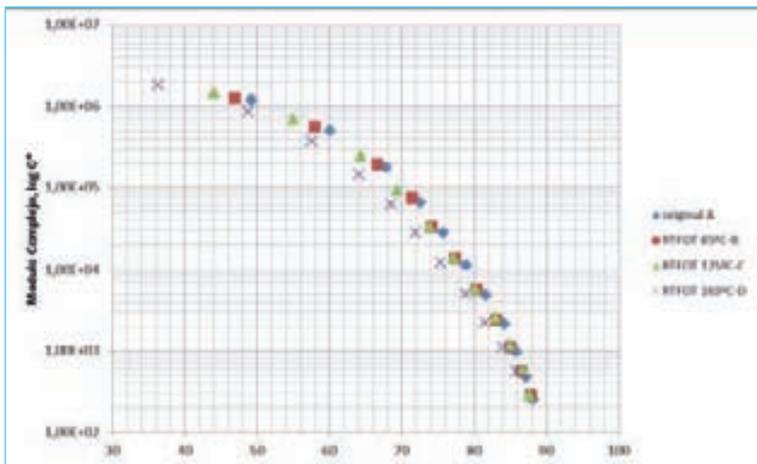


Figura 3. Diagrama de Black, ligantes RTFOT.

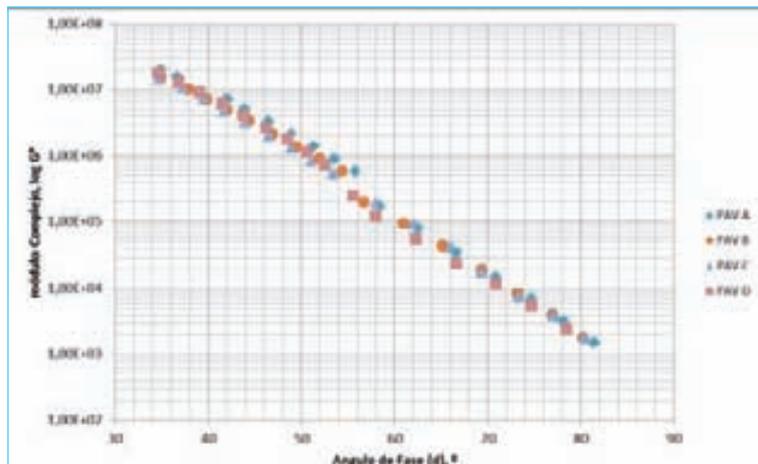


Figura 4. Diagrama de Black residuos PAV.

esto puede significar que tras un largo periodo del ligante en el firme, las propiedades alcanzadas en el mismo son independientemente de la temperatura de puesta en obra.

CONCLUSIONES

Los resultados de los ensayos realizados a los ligantes obtenidos en el RTFOT a diferente temperatura, muestran diferencias apreciables en parámetros como penetración, anillo y bola, y Fraas, además de composición química y caracterización reológica. Esto se puede traducir en diferencias de comportamiento de las mezclas asfálticas cuando se trabajan con técnicas de baja temperatura.

Para los residuos PAV, las diferencias en propiedades físicas, reológicas y de composición química nos son tan grandes como cabía esperar, la diferencia más significativa se presenta en los grupos estructurales carbonilo y sulfóxidos, que aumentan con el grado de envejecimiento del ligante, también el valor de Fraas presenta una variación gradual importante.

Como conclusión final, se ha comprobado en laboratorio, como el envejecimiento a corto plazo genera diferencias en los ligantes en función de la temperatura a la que

se lleve a cabo, mientras que el envejecimiento a largo plazo, parece igualar esas diferencias iniciales. Es de esperar que este comportamiento se haga notar en las propiedades de las mezcla asfálticas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- I. Corbett, L.W. 1969. "Composition of Asphalt Based on Generic Fractionation Using Solvent Deasphalting, Elution-Adsorption Chromatography, and Densimetric Characterization". Analytical Chemistry, 41: 576-579.
- II. ASTM 4124, "Standar Test Methods for the separation of Asphalt into four Fractions".
- III. Quddus, M.A., Sarwar, S.N., Khan, F., "The chemical composition of catalytic air blown asphalt", Fuel, Vol. 74, pp 684-689, 1995
- IV. Lamontagne, J., Dumas, P., and Mouillet, V., "Comparisons by Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy of different ageing techniques: Application to road bitumen" Fuel, Vol. 81
- V. M.N., Siddiqui, M.F. Ali, "Studies on the aging behaviour of the Arabian asphalts", Fuel, Vol 78, pp 1005-1015, 1999. 



Betunes modificados de baja temperatura. Ejecución de mezcla antifisuras



Baltasar Carlos RULLÁN MARQUÉS
Francisco José BARCELÓ MARTÍNEZ
Emilio MORENO MARTÍNEZ
José Luis PRADAS

*Ingeniero Jefe Conservación, Generalitat Catalunya
Centro de Tecnología Repsol
Centro de Tecnología Repsol
Asistencia Técnica Rlesa*

RESUMEN

El presente artículo pone de relieve la necesidad de adaptar las tecnologías para la reducción de la temperatura de trabajo de las mezclas asfálticas a las características de los betunes modificados, con la finalidad de conseguir unos resultados óptimos en obra.

La técnica de disminución de temperatura que se describe en este trabajo se ha desarrollado en el Centro de Tecnología de Repsol, y consiste en un betún modificado con menor viscosidad que los convencionales, formulado con aditivos que no perjudican propiedades de dicho betún modificado, tales como la recuperación elástica, la fragilidad Fraass y la ductilidad.

El artículo concluye que los betunes modificados de baja temperatura constituyen un paso más en el avance de las técnicas para reducir la temperatura de trabajo de las mezclas asfálticas.

Palabras clave: Mezclas asfálticas, Betunes modificados, Viscosidad, Aditivos

PROPIEDADES	NORMA	UNIDAD	PMB 45/80-75 BT	ESPECIFICACIÓN
Penetración	UNE EN 1426	0.1 mm	49	45-80
Punto Reblandecimiento	UNE EN 1427	°C	85	≥75
Punto Fragilidad Fraas	UNE EN 12593	°C	-20	≤ -15
Recuperación elástica	UNE EN 13398	%	85	≥80
Fuerza ductilidad, 5°C	UNE EN 13589	J/cm ²	8,7	≥3
Estabilidad al almacenamiento 180°C, UNE EN 13399				
Diferencia Penetración	UNE EN 1426	0.1 mm	2	≤13
Diferencia Punto Reblandecimiento	UNE EN 1427	°C	0,5	≤5
Resistencia al envejecimiento, UNE EN 12607-1				
Cambio de masa		%	-0,05	≤ 1,0
Penetración retenida	UNE EN 1426	%	75,5	≥60
Incremento punto de reblandecimiento	UNE EN 1427	°C	0,8	≤ 10

Tabla 1.

INTRODUCCIÓN

Dentro de las tecnologías que se han desarrollado para reducir la temperatura de trabajo de las mezclas asfálticas, el empleo de betunes modificados merece una especial atención, ya que la presencia de polímero en la composición del ligante hace que el comportamiento reológico del mismo difiera sensiblemente del de los betunes convencionales. Es necesario por tanto adaptar esas tecnologías a las características de los betunes modificados para conseguir unos resultados óptimos en obra.

En concreto, la técnica de disminución de temperatura empleada en la obra descrita a continuación, ha consistido en un betún modificado con menor viscosidad que los convencionales, que se ha formulado especialmente con aditivos que reducen la viscosidad, cuidando que estos aditivos no perjudiquen propiedades del betún modificado, tales como la recuperación elástica, fragilidad Fraass y ductilidad, que se pueden ver afectadas por la introducción de compuestos altamente cristalinos y rígidos, como pueden ser las ceras empleadas habitualmente en los ligantes asfálticos, con la finalidad de reducir viscosidad.

Hay que tener en cuenta que la naturaleza elastomérica del polímero modificador no se debe ver alterada, cuando se introduce en la formulación del betún modificado, el aditivo empleado para reducir la viscosidad, ya que las propiedades que el polímero transmite al betún pueden verse afectadas, y se puede dar el caso de no cumplir espe-

cificaciones, especialmente en las propiedades reseñadas anteriormente.

La mezcla asfáltica con la que se ha trabajado, es del tipo antifisuras, en la que se ha empleado un ligante del tipo PMB 45-80/75, pero de menor viscosidad que los PMB 45-80/75 con-

convencionales. La denominación de este nuevo ligante es PMB 45-80/75 BT. Este grado de betún modificado, es el que mayor concentración de polímero contiene para poder cumplir con las especificaciones de la norma UNE EN , y se suele trabajar a altas temperaturas (175°C) por lo que la obra suponía un reto técnico muy interesante para poner a prueba estos nuevos ligantes desarrollados en el Centro de Tecnología de Repsol.

CARACTERIZACIÓN DEL LIGANTE PMB 45-80/75 BT

El ligante de baja temperatura empleado en la obra cumple con las especificaciones de un PMB 45-80/75, pero con menores valores de viscosidad a las temperaturas típicas de trabajo para este grado de betún modificado (Tabla 1).

En lo referente a viscosidades, las curvas del betún modificado convencional y del de baja temperatura se

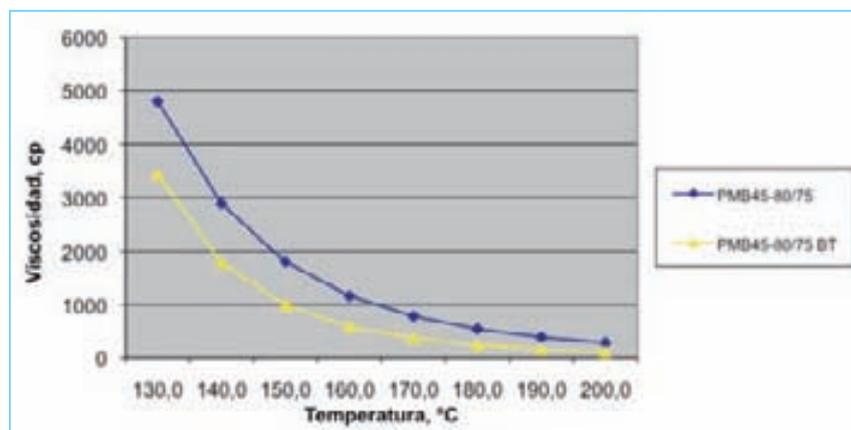


Figura 1.

TAMICES UNE	HUSO AC16S (OC 24/2008)	HUSO SMA	FÓRMULA DE TRABAJO
22.4	100	100	100
16	90-100	90-100	97.0
11.2		55-80	85.7
8	60-75	35-55	65.2
4	35-50	17-35	31.5
2	24-38	15-25	20.5
0.5	11-21	10-18	13.5
0.25	7-15		12.0
0.063	3-7	6-10	8.6

Tabla 2.

encuentran a continuación. Con el PMB 45-80/75 BT se consiguen reducciones en viscosidad que permiten reducir en 30°C la temperatura de trabajo en la mezcla asfáltica respecto a la temperatura necesaria para el ligante convencional (Figura 1).

ESTUDIO DE FÓRMULA DE TRABAJO

La obra donde se utilizó este ligante, consistió en el extendido de una capa de rodadura especial antifisuras, para prevenir la reflexión de grietas procedentes de la capa rígida de base del firme. En función de las diferentes fracciones de áridos a utilizar y sus granulometrías, se ha dosificado para obtener la curva de una AC16S modificada con rasgos de Stone Mastic Asphalt (SMA).

La composición granulométrica de áridos en frío se aprecia en la Tabla 2.

La mezcla se diseñó tomando como referencia el huso AC16S, abriendo la curva granulométrica y siguiendo la curva característica del huso tipo SMA, cumpliendo las especificaciones recogidas en el Artículo 542 del PG3 para T00.

En la determinación del óptimo de ligante se han empleado distintos porcentajes del mismo, y se han calculado los valores de densidad y huecos en mezcla (Figuras 2 y 3).

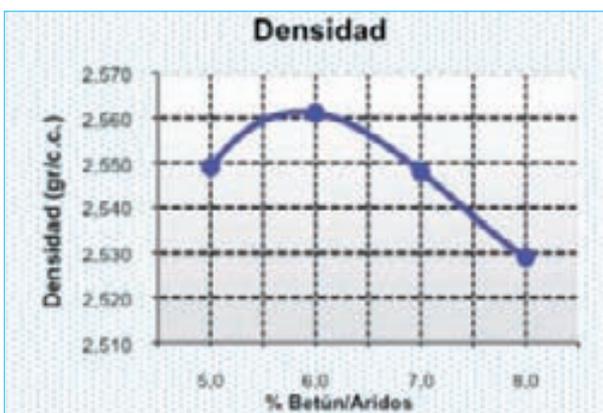


Figura 2.

Golpes por cara	75
Temperatura de mezclado	145-150°C
Temperatura de compactación	135-140°C
Densidad Aparente, EN 12697-6	2561 kg/m ³
Huecos en Mezcla, EN 12697-8	3,54 %
Estabilidad Proyecto, EN 12697-34	11,6 KN
Deformación Proyecto, EN 12697-34	3,0 mm
Sensibilidad al agua, EN 12697-12	93 %
Ensayo de Rodadura, EN 12697-22	0,031 mm/10 ³ ciclos
Propagación de fisura por el ensayo de flexión con probeta semicircular, UNE EN 12697 - 44	6270
Fuerza máxima, N	1.31
Deformación unitaria bajo fuerza máxima, εi (%)	3.47
Tensión máxima, N/mm ²	20.8
Resistencia Rotura, Kic (N/mm ^{3/2})	

Tabla 3.

Se ha escogido como óptimo el valor de un 6,0% de ligante sobre árido, que ha dado lugar a las características de la mezcla recogidas en la Tabla 3.

PUESTA EN OBRA

La obra consistió en la mejora de las características superficiales del camino de acceso a las pistas de esquí de Boi-Taüll, entre la urbanización de Pla de l'Ermita y la propia estación de esquí.

La longitud del tramo fue de 7.800 m con una anchura media de 6,5 m.

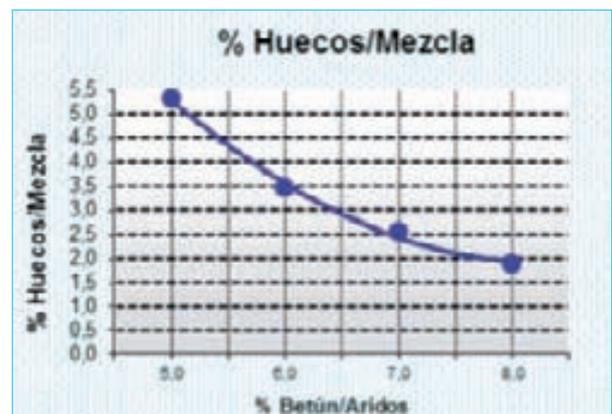


Figura 3.



Dentro de la obra se procedió a la transformación de las cunetas profundas en cunetas transitables previa ejecución del drenaje bajo cuneta y a la reposición de toda la barrera metálica de seguridad.

En cuanto al firme, éste presentaba muchas fisuras y estaba muy deteriorado con deformaciones en algunos puntos. Después de un bacheo previo se regularizaron las zonas deformadas y posteriormente se extendió una capa de regularización de hormigón asfáltico de tipo D10 de 3 cm de media a lo largo de todo el tramo.

Sobre dicha capa de regularización se extendió la capa de rodadura con betún antifisuras PMB 45-80/75 BT, con un espesor de 4,5 cm. En total se extendieron 6057 Tn de hormigón asfáltico.

Dada la altitud de la zona, 1630 m al inicio de la obra y 2040 al final de la misma, además de una mezcla antifisuras que difiriese el remonte de fisuras, se diseñó una mezcla con pocos huecos, similares a las SMA alemanas, a lo que contribuyó el alto contenido de betún. La mezcla aunque con pocos huecos presenta una rugosidad suficiente para evitar la formación de placas de hielo.

El transporte de la mezcla desde la central de fabricación, hasta el lugar de la puesta en obra, debido a los



condicionantes geográficos y de distancia, tenía una duración aproximada de cuatro horas, por lo que era necesario disponer de una mezcla que fuera trabajable (extendida y compactada) a temperaturas más bajas que las habituales, debido a la pérdida de calor producida en el transporte de la misma. En este caso la mezcla se compactó a 135-140°C (mismas temperaturas que en la fórmula de trabajo) sin ningún problema, cuando lo habitual para este tipo de ligante, de alto contenido de polímero, estaría sobre los 155-160°C.

Tampoco se observaron problemas de escurrimiento del ligante, debido a la alta dotación del mismo, las bañeras de transporte de la mezcla no presentaban un aspecto sucio tras la descarga.

CONCLUSIONES

Los betunes modificados de baja temperatura constituyen otro paso más en el avance de las técnicas que permiten reducir la temperatura de trabajo de las mezclas asfálticas. La obra llevada a cabo con el ligante PMB 45/80-75 BT, de baja viscosidad ha constituido un éxito técnico y ha ofrecido una solución muy buena para el transporte de mezcla asfáltica a largas distancias y puesta en obra a temperaturas más bajas que las habituales. 



Influencia de las características del betún y los másticos en la determinación de las temperaturas de fabricación y trabajo de las mezclas bituminosas



Andrés COSTA HERNANDEZ

Javier LOMA LOZANO

Emilio MORENO MARTÍNEZ

Asfaltos y Construcciones Elsan
Madrid, España

Asfaltos y Construcciones Elsan
Madrid, España

Centro Tecnología de Repsol
Madrid, España

RESUMEN

Uno de los parámetros con mayor importancia para la correcta aplicación de las mezclas bituminosas es la temperatura de fabricación, extendido y compactación. Existen varios factores que la determinan, algunos asociados a las características específicas de la obra (como son la temperatura ambiente, el espesor de capa o el tiempo de ejecución) pero generalmente relacionados con los componentes de la mezcla. No hay duda que la aplicación de estos materiales en condiciones inadecuadas de temperatura provoca una mala terminación así como deterioros acelerados con pérdida de las propiedades previstas para el pavimento.

En diferentes manuales de mezclas bituminosas y Pliegos de Condiciones se relaciona la temperatura de fabricación con la viscosidad del ligante, tanto para betunes convencionales como modificados. En ninguno de los documentos se hace ninguna referencia al mástico formado por el filler y el betún, teniendo gran importancia para la definición de sus características.

Se presenta un trabajo sobre la variación de las características más significativas en estos materiales que tienen influencia en la determinación de las condiciones de fabricación y puesta en obra, como son la viscosidad, para diferentes tipos de ligante, y especialmente ensayos con los másticos formados por el filler y el betún. Por último relacionaremos todos estos resultados con ensayos de trabajabilidad y compactabilidad efectuados sobre una mezcla bituminosa fabricada con esos materiales.

Palabras clave: *Temperatura de fabricación, Másticos, Mezclas bituminosas, Relación filler-betún.*

INTRODUCCIÓN

La determinación de la temperatura correcta de fabricación, extendido y compactación de una mezcla bituminosa es un proceso complicado que se puede fundamentar desde numerosos puntos de vista tanto teóricos como prácticos. Sobre este último aspecto destacamos el trabajo "Efecto de la temperatura de compactación sobre el módulo resiliente de las mezclas asfálticas", ganador de la II edición del premio internacional a la innovación en carreteras D. Juan Antonio Fernandez del Campo, en el cual se demuestra la necesidad de alcanzar la densidad de la mezcla a una temperatura adecuada, ya que de no ser así, disminuye el módulo resiliente y por tanto la durabilidad de la misma.

En diferentes manuales de fabricación de mezclas bituminosas y en los Pliegos de Condiciones (pe: los Artículos 542 y 543 del PG-3 en España) señalan que la temperatura de fabricación para estos materiales esta determinada de acuerdo con la viscosidad del ligante, no superando los 180 °C para ligantes convencionales (165 °C para plantas con tambor secador mezclador) y para los betunes modificados es el suministrador quien señala las temperaturas, a modo de recomendación, en función de la curva de viscosidad-temperatura de sus productos, pero en ninguno de los documentos se hace referencia alguna al mástico formado por el filler y el betún.

En la actualidad existe un número amplio de betunes diferentes: convencionales con distintas procedencias y durezas, modificados en varios grados (de dureza, de modificación, de viscosidad), de caucho con diferentes contenidos de NFU, para los cuales siempre empleamos los mismos y únicos criterios de determinación de la temperatura de fabricación y aplicación.

En esta comunicación se presenta una parte del trabajo efectuado entre el Laboratorio de Asfaltos del CENTRO TECNOLÓGICO DE REPSOL y el Laboratorio de control de calidad y de investigación de ASFALTOS Y CONSTRUCCIONES ELSAN donde se determina la influencia de la viscosidad tanto del ligante como del mástico formado con diferentes relaciones de filler y extrapolándolo a un nuevo ensayo de trabajabilidad. Por último también se estudia el efecto de estos másticos en ensayos de compactabilidad.

DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA DE FABRICACIÓN EN LAS MEZCLAS BITUMINOSAS

Las temperaturas de fabricación, extendido y compactación vienen determinadas normalmente por la viscosidad

DOCUMENTO	VALORES	OBSERVACIONES
Artículo 542 del PG-3 (OC 24/2008):		
Mezclas con betún convencional. Temperatura de mezclado.	150-300 cSt	Max180 °C,excepto plantas tambor-mezclador(165°C) o MAM (190°C).
Mezclas con betunes mejorados con caucho o modificados con polímeros.	A definir por el fabricante	
Artículo 543 del PG-3 (OC 24/2008):		
Mezclas discontinuas con betún convencional	250-450 cSt	Max. 180 °C, excepto plantas tambor-mezclador (max. 165°C) o las porosas o BBTM B que será de 170°C.
Mezclas drenantes con betún convencional	400-700 cSt	
Mezclas bituminosas con betunes mod. con polímeros o mejorados con caucho	A definir por el fabricante	
NLT.- 159/00: Ensayo Marshall		
Para mezclas con betún convencional	150-190 cSt	Para mezclado en fabricación
	250-310 cSt	Para compactación
UNE EN 13108-1: Hormigón asfáltico		
B 20/30	160-200 °C	Temperatura máxima y mínima en la planta. Para betunes convencionales.
B 30/45	155-195 °C	
B 35/50, B40/60	150-190 °C	
B 50/70, 70/100	140-180 °C	
B100/150, 160/200	130-170 °C	
Manual de control de fabricación y puesta en obra de mezclas bituminosas (MOPU-1978)		
Para mezclas con betún convencional	150-300 cSt	Mezclas densas
	300-1000 cSt	Mezclas abiertas
Manual del instituto del asfalto, Superpave Mix design (SP-2)		
Genéricamente	0.17±0.02 Pa.s	
	0.28±0.03 Pa.s	

Tabla 1. Valores de viscosidad de ligantes.

del ligante. El betún es un material viscoelástico que mantiene diferente estado a distintas temperaturas, es decir, pasamos de un estado líquido a una temperatura elevada (generalmente superiores a 100 °C) a un estado sólido a temperaturas por debajo de los 30 °C. En la mezcla el ligante debe encontrarse a la viscosidad adecuada que permita una envuelta homogénea con los áridos así como el extendido y la compactación. Hay varios documentos donde se indica que valor debe alcanzar la viscosidad de betún (Tabla 1).

VISCOSIDADES

La viscosidad se define genéricamente como la oposición de un fluido al movimiento cuando se aplica una fuerza externa. En nuestro caso, esta propiedad en los ligantes bituminosos depende de su cohesión interna, estructura química, temperatura, etc. Este trabajo trata únicamente sobre las viscosidades en estado líquido de los ligantes pretendiendo conocer su comportamiento en las etapas de mezclado y compactación, ya que en estado sólido (visco-elástico) sus propiedades mecánicas son más complejas y se describen por su módulo de visco-elasticidad (reología del betún).

Como regla general, los betunes de destilación puros son líquidos newtonianos, es decir, su viscosidad no depende del esfuerzo exterior al que se les somete, mientras que muchos de los asfaltos modificados, especialmente con polímeros, tienen un comportamiento no newtoniano, por lo que la viscosidad dependerá del esfuerzo aplicado.

Como se ha mencionado anteriormente, existen diferentes recomendaciones del valor de la viscosidad de un ligante a la hora de su empleo, y también varias formas de medirla, desde viscosidades capilares con y sin vacío, viscosidades rotacionales, viscosidades cono-placa o placa-placa.

35/50+FÍLLER DE RECUPERACIÓN					
Ensayo/ relación f/b	0	0.8	1.1	1.4	1.7
Penetración, 1/10 mm	47	33	27	23	20
Punto reblandecimiento, °C	52,6	54,2	56	61	65
Índice Penetración	-0,72	-1,11	-1,11	-0,45	-0,01
Viscosidad Brookfield, Pa.s					
130	0,742	1,677	3,680	7,403	9,320
150	0,278	0,614	1,340	3,030	3,360
170	0,130	0,255	0,517	1,807	2,199
190		0,129	0,311	1,235	1,540
BBTE+FÍLLER DE RECUPERACIÓN					
Ensayo/ relación f/b	0	0.8	1.1	1.4	1.7
Penetración, 1/10 mm	47	35	28	25	21
Punto reblandecimiento, °C	64,4	90	93	97	100
Índice Penetración	1,71	4,67	4,49	4,67	4,61
Viscosidad Brookfield, Pa.s					
130	0,384	0,710	1,108	2,551	3,820
150	0,163	0,298	0,545	1,115	1,628
170	0,080	0,142	0,424	0,709	0,924
190		0,091	0,198	0,673	0,785
BM-3C+FÍLLER DE RECUPERACIÓN					
Ensayo/ relación f/b	0	0.8	1.1	1.4	1.7
Penetración, 1/10 mm	58	38	36	29	25
Punto reblandecimiento, °C	66,2	70	71,5	72	76
Índice Penetración	2,59	2,14	2,25	1,84	2,12
Viscosidad Brookfield, Pa.s					
130	2,447	3,233	4,797	5,342	8,324
150	0,842	1,221	1,822	1,935	2,584
170	0,390	0,552	0,804	0,880	1,030
190	0,209	0,259	0,409	0,460	0,501
BM-3F+FÍLLER DE RECUPERACIÓN					
Ensayo/ relación f/b	0	0.8	1.1	1.4	1.7
Penetración, 1/10 mm	58	44	30	28	24
Punto reblandecimiento, °C	85,1	87,3	90,7	96,4	98,3
Índice Penetración	5,40	4,92	4,39	4,86	4,72
Viscosidad Brookfield, Pa.s					
130	2,651	12,450	15,073	17,541	19,330
150	1,072	4,739	5,555	6,251	7,228
170	0,510	2,129	2,497	2,876	3,270
190	0,280	1,098	1,287	1,502	1,860

Tabla 2. Características de betunes y másticos. (Primera parte).

La forma de interpretar o valorar estas viscosidades también puede ser diferente, como aplicar criterios de viscosidad pura a una temperatura dada, utilizar equi-

cosidades, la viscosidad a esfuerzo cero (zero shear viscosity), etc..

Con el fin de comprobar el efecto que tiene la composición del mástico de las mezclas asfálticas en su manejabilidad, en este trabajo se ha medido la viscosidad con un viscosímetro rotacional Brookfield, tanto de los betunes como de másticos con varias naturalezas de filler y distintas relaciones (desde 0.8 a 1.7), siguiendo la norma EN 13302. Para este ensayo se ha tomado como unidad de medida Pa.s (pascal por segundo) ya que la relación con los másticos puede hacer variar de forma considerable los resultados finales del ensayo debido a la diferente densidad, en lugar de stokes. También se han realizado los ensayos de penetración EN 1426 y punto de reblandecimiento EN 1427. Con estas medidas podremos comprobar si en cada betún, para una viscosidad y una relación f/b recomendada, la temperatura de manipulación del mástico varía con la cantidad de filler incorporado.

TRABAJO EXPERIMENTAL

1. Descripción de los trabajos

Se han utilizado varios tipos de betunes, fabricados por Repsol, que son:

- Betunes: B 35/50, BM-3f, BM-3c, BMAV-3, BC35/50 y BETUN SEMICALIENTES (BBTE)

Se han empleado distintos tipos de filler:

- Recuperación planta, carbonato cálcico y cemento.

BC 35/50+FÍLLER DE RECUPERACIÓN					
Ensayo/ relación f/b	0	0.8	1.1	1.4	1.7
Penetración, 1/10 mm	50	34	27	26	20
Punto reblandecimiento, °C	57,9	65,4	67,3	71,8	78,8
Índice Penetración	0,60	1,12	0,95	1,58	2,05
Viscosidad Brookfield, Pa.s					
130	1,985	5,666	10,540	24,417	82,940
150	0,716	2,078	4,337	10,106	42,420
170	0,311	0,890	2,084	4,226	24,153
190	0,164	0,418	0,859	1,966	5,832

Tabla 2. Características de betunes y másticos. (Segunda parte).

Se han efectuado los siguientes ensayos:

- Caracterización de los betunes: Penetración, Punto de reblandecimiento anillo y bola, Índice de penetración y Viscosidad (130/150/170/190°C)
- Ensayos del mástico para relación f/b de 0,8-1,1-1,4-1,7: Penetración, Punto de reblandecimiento anillo y bola, Índice de penetración y Viscosidad (130/150/170/190°C)
- Ensayo sobre una mezcla bituminosa: Trabajabilidad en el mezclado (viscosidad) y Compactibilidad bajo norma UNE 12697-10

2. Resultados

Caracterización de los betunes y de los másticos (Tabla 2).

Representando los valores de viscosidad de los ligantes en un gráfico semilogarítmico frente a la temperatura, se aprecia que el betún más viscoso es el BM-3f seguido del BM-3c, y el menos viscoso resulta el betún de baja temperatura de fabricación y extendido (BBTE). De los datos obtenidos, tradicionalmente tomaríamos como temperaturas de mezcla las correspondientes a una viscosidad de 150-300 cSt (aproximadamente

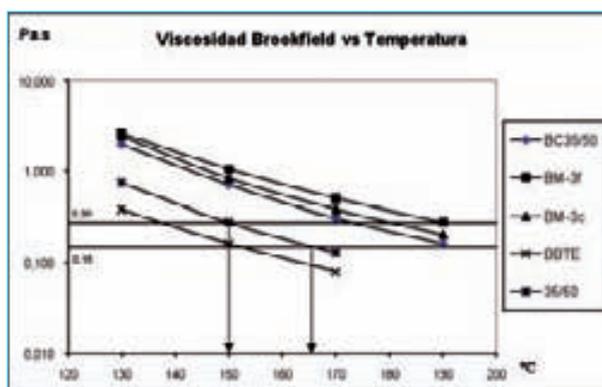
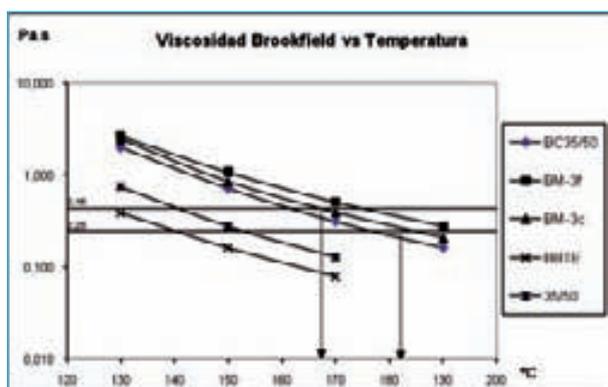


Figura 1. Obtención de temperaturas de trabajo según curva de viscosidad.

BETÚN	MEZCLA	Tª MEZCLADO	VISCOSIDAD	R F/B RECOMENDADA	R F/B ESTÁNDAR
35/50	Mezclas D,S,G	150-166°C	150-300 cSt o aprox 0.150-0.300Pa.s	0.9-1.2	1.1
BBTE	Mezclas D,S,G	136-153°C	150-300 cSt o aprox 0.150-0.300Pa.s	0.9-1.2	1.1
BM-3c	Mezclas F, M y PA	169-183°C	250-450 cSt o aprox 0.25-0.450 Pa.s	0.9-1.6	1.4/1.2/1.0
BM-3f	Mezclas F, M, PA, SMA, antifisuras..	175-191°C	250-450 cSt o aprox 0.25-0.450 Pa.s	0.9-1.6	1.4/1.2/1.0
BC35/50	Mezclas D,S,G	173-190°C	150-300 cSt o aprox 0.150-0.300Pa.s	0.9-1.2	1.1

Tabla 3. Temperaturas de mezcla.

0.150-0.300 Pa.s), por ejemplo en el caso de un ligante B 35/50 la temperatura de mezclado correspondiente a esa viscosidad es de 150-166°C. También, en el caso de un BM-3c, con las viscosidades 0.250-0.450 Pa.s las temperaturas de mezclado son 169-183°C, como puede verse en la Figura 1.

Si tomamos la recomendación del Artículo 542 del PG-3 en lo que respecta a viscosidades y relaciones filler/betún obtendríamos para cada betún y tipo de mezcla (Tabla 3).

Tomando el caso del 35/50; para una viscosidad de 0.15-0.3 Pa.s tenemos un rango de temperatura de mezcla de 150-166 °C. En el caso de que tengamos una mezcla con contenido de betún y relación f/b estándar de 1.1, el mástico a esas temperaturas tiene una viscosidad de 0.74-1.44 Pa.s. Es lógico suponer que para que se reproduzcan las mismas condiciones de mezclado, cualquier otra relación f/b debería tener la misma viscosidad. Si llevamos todos los datos de viscosidad de los diferentes másticos a un gráfico xyz (Figura 2) tendremos que, siguiendo las líneas de separación del rango 0.74/1.44, para mantener la viscosidad del mástico al bajar la relación f/b a 0.9 podríamos disminuir la temperatura unos 10°C. De la misma forma, si aumentamos la relación f/b a 1.2 tendríamos que aumentar la tem-

peratura 10°C aproximadamente. Esto no quiere decir que las temperaturas de mezcla del aglomerado global deban cambiarse en la misma magnitud, ya que no solamente el mástico influye en su viscosidad/trabajabilidad, el resto del esqueleto mineral también aporta su efecto.

Este gráfico es complicado de utilizar, por lo que para ver la variación de temperaturas con la relación f/b se han obtenido los logaritmos naturales de las viscosidades, y extrapolado con una ecuación ajustada a cada relación f/b y temperatura, obteniéndose los siguientes valores (Tabla 4).

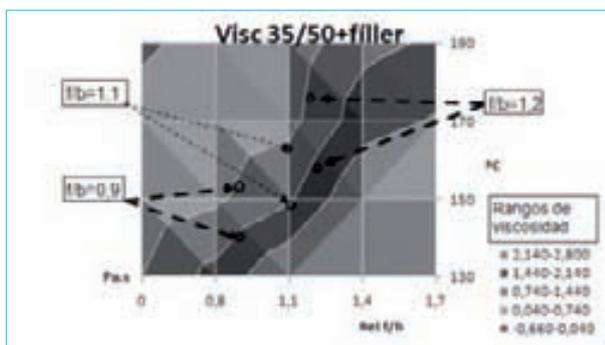


Figura 2. Viscosidad mástico vs Temperatura y relación f/b.

B35/50 + FÍLLER RECUPERACIÓN				
f/b 1.1	0,8	1,1	1,4	1,7
Tª a 0.77 Pa.s (máxima)	147	166	203	210
Tª a 1.44 Pa.s (mínima)	132	150	181	188
BBTE + FÍLLER RECUPERACIÓN				
f/b 1.1	0,8	1,1	1,4	1,7
Tª a 0.57 Pa.s (máxima)	134	153	189	195
Tª a 0.92 Pa.s (mínima)	120	136	167	177
BC35/50+ FÍLLER RECUPERACIÓN				
f/b 1.1	0,8	1,1	1,4	1,7
Tª a 0.88 Pa.s (máxima)	171	190	208	240
Tª a 1.75 Pa.s (mínima)	156	173	192	224
BM-3C+ FÍLLER RECUPERACIÓN				
f/b 1.4	0,8	1,1	1,4	1,7
Tª a 0.56 Pa.s (máxima)	170	181	183	185
Tª a 1.01 Pa.s (mínima)	156	166	169	173
BM-3F+ FÍLLER RECUPERACIÓN				
f/b 1.4	0,8	1,1	1,4	1,7
Tª a 1.30 Pa.s (máxima)	184	187	191	196
Tª a 2.50 Pa.s (mínima)	168	172	175	180

Tabla 4. Temperaturas obtenidas para cada mástico.

F/B 1.1	35/50	BBTE	BC35/50
Tª mezcla, °C	150-166	136-153	173-190
Viscosidad mástico, Pa.s	0.77-1.44	0.57-0.92	0.78-1.55
F/B 1.4	BM-3C	BM-3F	
Tª mezcla, °C	169-183	175-191	
Viscosidad mástico, Pa.s	0.56-1.01	1.30-2.50	

Tabla 5. Viscosidades de trabajo para cada ligante.

De todas las curvas obtenidas, una de las observaciones más curiosas, es la baja susceptibilidad de los dos betunes modificados a la variación de la relación filler/betún. En cambio el caso del betún mejorado con caucho es el que muestra una mayor variación de las temperaturas de mezclado con la variación de filler.

Otro de los resultados llamativos es que las viscosidades de los másticos de cada betún a una misma relación f/b para una temperatura de equivalencia de los betunes originales, no son iguales. Esto significa que si un mástico de 35/50 en f/b=1.1 tiene una viscosidad de 0.77-1.44 Pa.s, cualquier otro mástico debería dar el mismo valor para una manejabilidad equivalente. Pero como podemos comprobar (Tabla 5), esto no es así:

Estos resultados parecen indicar que el filler no tiene el mismo comportamiento con todos los betunes, y por lo tanto no se puede generalizar una pauta.

Lo que si resulta evidente es la dependencia de la viscosidad del mástico con la cantidad de filler presente en él, y que es un efecto a tener en cuenta para el cálculo de temperaturas de manejo, y que no afecta por igual a los diferentes betunes.

3. Ensayos de las mezclas

Una vez que se ha comprobado la variabilidad de la viscosidad de un mástico en función del filler, realizamos ensayos con mezcla asfáltica, con el fin de determinar si esta variación se aprecia nuevamente en el conjunto de la mezcla. Para eliminar la posible influencia del árido grueso en la viscosidad de la mezcla, se ha empleado un microaglomerado de granulometría continua (AC8) con tamaño máximo hasta 8 mm. con materiales de las instalaciones de Elsan en Madrid (caliza y sílice) y todo el filler calizo de aportación. El porcentaje de ligante empleado en todas las mezclas es



Figura 3. Equipo de medida

siempre de un 6,00 % sobre el peso de los áridos, que corresponde con 5,66 % sobre el peso de la mezcla. Para las muestras ensayadas con diferente relación filler/betún se modifica la cantidad de filler, dejando fijo el porcentaje de ligante.

4. Trabajabilidad

Para conocer la viscosidad de las mezclas a determinadas condiciones simulando el proceso de mezclado, hemos puesto a punto un equipo que consiste en un agitador tipo IKAVISC, dotado de un medidor de par, accionado a 20 revoluciones por minuto y que transmite

RELACIÓN F/B:0,8						
Temperatura	35/50	BM3c	BC 35/50	BMAV-3	BM-3f	BBTE
130	172	158	185	164	197	153
150	128	142	178	161	158	149
170	111	127	156	148	142	143
190	104	108	124	123	139	125
RELACIÓN F/B:1,1						
130	186	212	221	197	215	201
150	170	205	199	187	194	170
170	154	160	176	156	162	162
190	125	126	136	129	137	143
RELACIÓN F/B:1,4						
130	217	221	214	214	212	176
150	207	188	191	197	188	158
170	174	172	171	164	179	142
190	159	154	159	142	143	102
RELACIÓN F/B:1,7						
130	220	220	216	210	220	181
150	208	190	211	198	202	173
170	176	173	195	180	174	161
190	164	163	191	161	161	146

Tabla 6. Valores de Torque para cada ligante, temperatura y relación f/b.

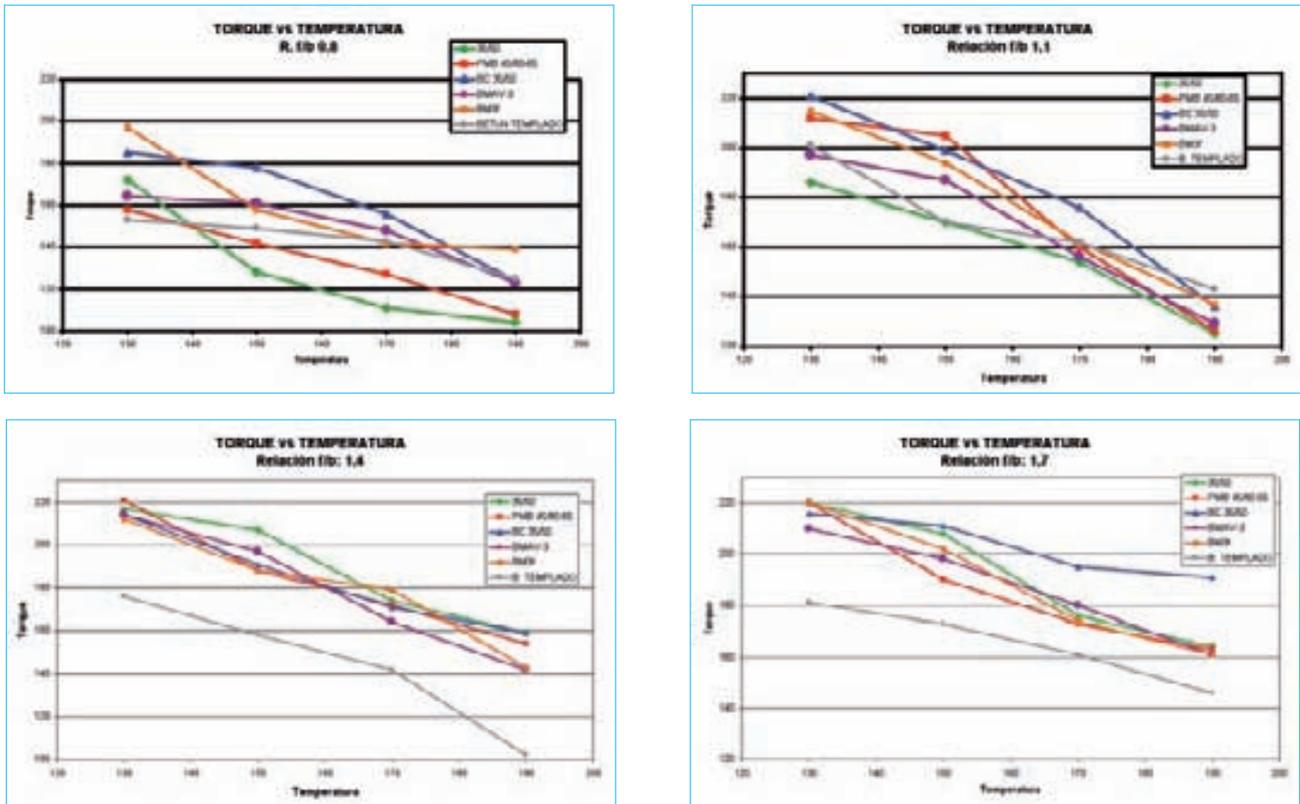


Figura 4. Valores de Torque para cada ligante, temperatura y relación f/b.

a una unidad una señal que la definimos como torque (en N.cm), la cual aumenta a medida que precisamos mayor esfuerzo para el mezclado y disminuye cuando la mezcla ofrece menor resistencia (Figura 3). En este caso las viscosidades obtenidas (Tabla 6) tienen un valor comparativo, y no absoluto dado el desconocimiento del factor de forma del agitador. La mezcla se ha mantenido a la temperatura de ensayo mediante una cubeta calorifugada.

Según los resultados obtenidos en este estudio, a medida que aumenta la relación filler/betún en la mezcla, la trabajabilidad (resistencia a la envuelta) entre todos los ligantes tiende a igualarse, dejando aislado al betún BBTE (betún templado) que mantiene valores mucho más reducidos en todos los casos. En la relaciones filler/betún bajas (0,8 y 1,1), además del ligante BBTE (siempre en la zona de bajo torque) el betún convencional también tiene valores bajos, siendo los betunes modificados y el betún mejorado con caucho los que se encuentran en la zona de mayor resistencia. A partir de la relación f/b de 1,4 todos los ligantes tienden a agruparse, excepto, como ya hemos advertido, para el betún BBTE. Es reseñable igualmente que el betún mejorado con caucho siempre destaca en la zona de mayor resistencia.

BETÚN 35-50				
Relación f/b	0,8	1,1	1,4	1,7
Temperatura de mezclado	140	158	192	199
Torque	150	163	158	158
BETÚN BBTE				
Relación f/b	0,8	1,1	1,4	1,7
Temperatura de mezclado	127	145	178	186
Torque	155	178	128	148
BETÚN BC 35/50				
Relación f/b	0,8	1,1	1,4	1,7
Temperatura de mezclado	164	182	200	232
Torque	165	158	150(*)	160(*)
BETÚN BM-3C				
Relación f/b	0,8	1,1	1,4	1,7
Temperatura de mezclado	163	174	176	179
Torque	135	150	165	168
BETÚN BM-3F				
Relación f/b	0,8	1,1	1,4	1,7
Temperatura de mezclado	176	180	183	188
Torque	142	150	157	163

(*) Resultados estimados.

Tabla 7. Torque vs temperatura.

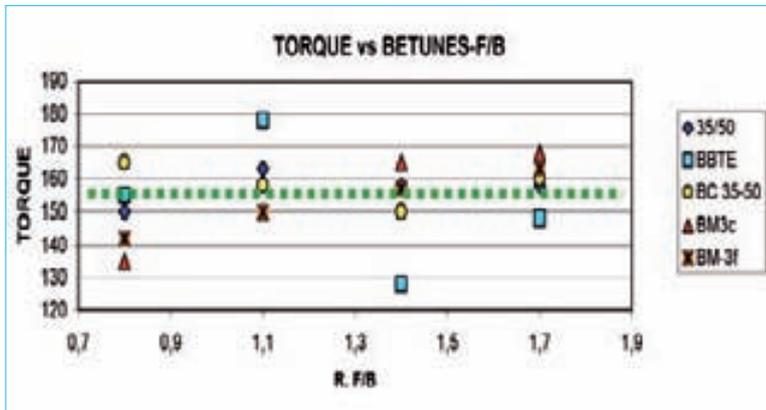


Figura 5. Representación del torque.

Dado que este procedimiento de medida del torque a diferentes temperaturas empleado en este trabajo tiene carácter experimental, se ha pretendido además estudiar si existe alguna correlación en este procedimiento y si puede ser adecuado para determinar las temperaturas de trabajo en las mezclas bituminosas. A continuación (Tabla 7) se indican los valores de torque, de cada tipo de betún y el valor de filler-betún, relacionándolo con la temperatura correspondiente a los promedios de los resultados obtenidos para ese concepto en la viscosidad de los másticos ensayados. Se obtienen los siguientes resultados:

Si representamos los torques (Figura 5) vemos que la desviación típica es de 11,5, aunque llama la atención el valor obtenido para los promedios, siendo muy homogéneos entre ellos y con escasa dispersión (155 ± 3), quedando el 85 por ciento de los resultados (3 de 20 datos) dentro del valor medio $\pm 10\%$. A pesar de no tener suficientes datos, se puede considerar la posibilidad de estudiar un sistema, este u otro similar, que permita determinar la temperatura de trabajabilidad para las mezclas bituminosas en caliente.

5. Ensayo de compactabilidad en 12697-10

En este ensayo se ha optado por la variante de la compactación con compactador giratorio (600kPa y 1.25°). Se han tomado las mismas mezclas y se ha representado el contenido de huecos de las mezclas en función del logaritmo natural de giros. Posteriormente se ha obtenido la ecuación de cada curva siguiendo el modelo (Ecuación 1):

$$v(ng) = v(1 - (K * \ln ng)) \quad (1)$$

La pendiente de la recta, k, expresa el grado de compactabilidad de la mez-

cla; cuanto mayor es la pendiente, tanto más fácilmente se compacta la mezcla (Tabla 8).

Prácticamente todos presentan una disminución en la compactabilidad al aumentar la relación f/b, especialmente en valores de 1.4 a 1.7. Los valores de menor pendiente son para el BM-3f y los de mayor para el 35/50 y el BBTE (este último presenta un valor anómalo en 1.7 donde presenta mejor compactabilidad que en valores inferiores).

En esta ocasión, el aumento de la dotación de filler afecta con mayor intensidad al BM-3f, BMAV y BC35/50, resultando el resto menos susceptibles.

Una disminución muy acusada de la pendiente, si hay un incremento acusado de la relación f/b expresa que en la obra se necesite un grado de compactación o temperatura mayor.

CONCLUSIONES

En este trabajo de laboratorio, que actualmente continua desarrollándose en ambos laboratorios, queda demostrado que existen algunos factores, además de la viscosidad del ligante, que tienen elevada importancia en la definición de las temperaturas de mezclado y trabajo de las mezclas bituminosas. Destacamos las conclusiones siguientes:

- En la mayoría de la normativa vigente, la temperatura de utilización de un ligante bituminoso para la fabricación de mezclas asfálticas, se determina a partir de su viscosidad. De los estudios y ensayos realizados parece claro que, para definir las temperaturas de trabajo, ya sea de mezclado o de puesta en obra, de las mezclas bituminosas en caliente, se deben tener en cuenta también otros factores como son: la composición de la mezcla, la capa a extender, la temperatura ambiente, el módulo de riqueza, etc.
- El valor de la relación filler/betún en la viscosidad final del mástico, y por lo tanto de la mezcla, tiene gran importancia,

	PENDIENTE, K					
f/b	BC35/50	BM-3f	BMAV	BM-3c	35/50	BBTE
0.8	-2,96	-2,70	-3,33	-3,33	-3,47	-3,48
1.1	-3,01	-2,74	-3,26	-3,02	-3,51	-3,33
1.4	-2,68	-2,81	-3,22	-2,80	-2,73	-2,99
1.7	-1,64	-1,77	-2,49	-2,81	-2,68	-3,47
Tª compactación	145	160	160	160	160	125

Tabla 8. Valor de la pendiente k.

especialmente con valores extremos. Se ha comprobado que esta influencia es mayor para betunes convencionales y betunes con caucho, mientras que los betunes modificados con polímeros son menos sensibles a tal efecto.

- Se ha comprobado también que la variación de la relación filler/betún de una mezcla bituminosa en caliente, hace variar sus propiedades reológicas y, por tanto, su comportamiento frente a su manejabilidad, lo cual ha sido posible medir con un simple proceso empírico. En los diferentes ensayos comparativos efectuados, se manifiesta una clara diferencia de comportamiento de la mezcla, en la manejabilidad o trabajabilidad, con la variación de la temperatura de mezclado y con la composición del mástico (relación f/b), relacionándolo también con los datos obtenidos de las viscosidades de los másticos. Esta influencia es de menor grado cuando se utilizan ligantes modificados con polímeros.
- Mediante el ensayo de compactibilidad se ha puesto de manifiesto, nuevamente, que el contenido de filler en la mezcla influye en la facilidad de compactación de la misma. Los diferentes ensayos que se han efectuado sobre la mezcla bituminosa en caliente fabricada, como son el de compactibilidad y el ensayo de trabajabilidad, son complementarios a las curvas de viscosidad del ligante y deben ser tenidos en cuenta para determinar las temperaturas de mezclado y de puesta en obra para cada tipo de mezcla.
- En este trabajo no se ha pretendido cuantificar el grado de aumento o disminución de las temperaturas de trabajo de las mezclas bituminosas en caliente, en función de la variación de las características del ligante y de la relación filler-betún. Por el contrario sí se ha querido llamar la atención sobre la influencia de la relación filler-betún que, en numerosas ocasiones, puede resultar de gran utilidad

para establecer los valores de las temperaturas de fabricación y puesta en obra más adecuadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- I. PG-3 Orden Circular 24/2008. Artículos:
 - a. 211 Betunes asfálticos
 - b. 215 Betunes asfálticos modificados con polímeros
 - c. 542 Mezclas bituminosas en caliente tipo hormigón bituminoso.
 - d. 543 Mezclas bituminosas para capas de rodadura. Mezclas tipo discontinuas y drenantes.
- II. Grupos de Normas UNE EN 13108 y UNE EN 12697.
- III. Norma de ensayo NLT 159/00: Ensayo Marshall.
- IV. Norma de ensayo EN 13302. Determinación de la viscosidad del betún usando un viscosímetro rotacional.
- V. II Premio internacional a la innovación en carreteras del año 2007, D. Juan Antonio Fernandez del Campo: "Efecto de la temperatura de compactación sobre el módulo resiliente de las mezclas asfálticas". Pedro Limón Covarrubias, Ignacio Cremades Ibáñez, Rodrigo Miró Recasens, Paul Garmica Anguas.
- VI. Manual control de fabricación y puesta en obra de mezclas bituminosas (MOPU-1978).
- VII. Manual del instituto del asfalto, Superpave Mix design (SP-2).
- VIII. Report 459 NCHRP (National Cooperative Highway Research Program) 



Reciclado en central en caliente de capas bituminosas



Jesús FELIPO SANJUÁN

Director Técnico
Pavasal Empresa Constructora S.A.

RESUMEN

En el presente artículo se expone el proceso seguido para la fabricación en central en caliente de mezclas bituminosas recicladas con una alta tasa de mezclas envejecidas, así como también algunas recomendaciones y precauciones a seguir basadas en diferentes experiencias de obra. También se plantean posibles innovaciones en el proceso que puedan resolver algunas de las cuestiones planteadas a lo largo del artículo.

Palabras clave: Reciclado, Mezcla bituminosa reciclada, Ligante, Fresado, RAP, Mezclas bituminosas semicalientes.

INTRODUCCIÓN

Es bien conocida la posibilidad de reutilización de las mezclas bituminosas una vez alcanzado el final de su vida útil, mediante reciclados del material, empleando diferentes técnicas, tanto en caliente como en frío.

Una de las técnicas que ofrece mayor seguridad en la calidad y homogeneidad del producto fabricado con el material fresado obtenido de las carreteras es el reciclado en caliente en central, tecnología que está normalizada en la legislación española y que está siendo aplicada con éxito en diversidad de oportunidades. Se han realizado obras tanto con bajas como con altas tasas de fresado en la mezcla final (incluso superiores al 50%), aunque lo más habitual es reciclar con porcentajes entre el 10% y el 30%.

El reciclado de mezclas bituminosas envejecidas genera importantes beneficios ambientales, principalmente el reaprovechamiento de materiales valiosos, de forma que, además de resolver el problema de los residuos generados en el fresado, permite reducir el consumo de materias primas no renovables, como son el betún y los áridos, para obtener como resultado final mezclas recicladas con características similares a las convencionales.

Esta técnica se puede realizar tanto con plantas continuas como discontinuas, siempre y cuando estén adaptadas para dicho fin, cuidando los aspectos técnicos, pero también los aspectos ambientales, fundamentales para conseguir mezclas sostenibles.

Cuando el porcentaje de fresado incorporado a la mezcla es elevado, es fundamental para la calidad final del producto tanto el proceso de diseño de la mezcla como el tratamiento y estudio previo de los materiales a emplear, sin olvidar el proceso de fabricación. Es por ello que en este artículo nos vamos a centrar en todos estos aspectos, haciendo especial hincapié en aquellos apartados que podemos considerar más novedosos y que pueden afectar de forma sustancial al producto final obtenido, basado en la experiencia obtenida en obras realizadas con porcentajes del 50% o superiores de mezcla envejecida incorporada a la mezcla final.

ESTUDIOS PREVIOS

Una vez definidas las características de las mezclas a fabricar, es necesario conocer de la mejor forma posible las materias primas que se van a emplear, teniendo en cuenta que un elevado porcentaje de ellas proviene directamente del fresado de las mezclas envejecidas. A

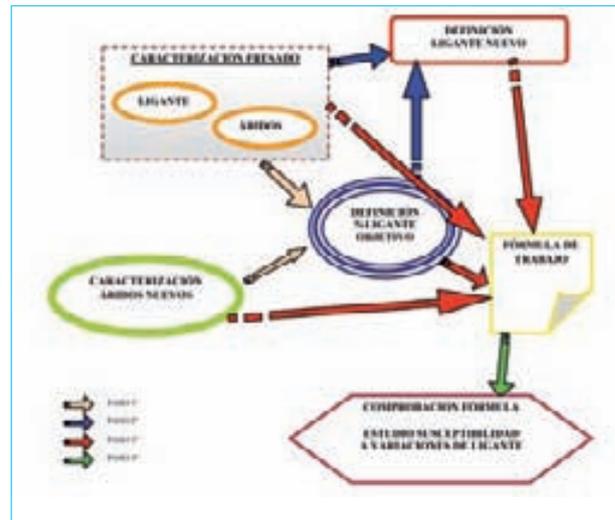


Figura 1. Metodología obtención fórmula de trabajo.

continuación se adjunta un cuadro con los pasos a seguir para obtener la fórmula de trabajo.

El primer paso, al igual que con cualquier tipo de mezcla bituminosa, consiste en caracterizar las materias primas a emplear, tanto los áridos nuevos como el fresado, y a partir de las características de los mismos y del conocimiento de las mezclas a fabricar se procede a establecer el ligante objetivo de la mezcla final, para que sea posible definir las características del ligante nuevo, de manera que la mezcla de betunes nuevo y envejecido nos dé como resultado un ligante que se comporte de forma adecuada, comparado con el mismo tipo que se hubiese empleado en el caso de una mezcla convencional. Una vez conocidas todas las materias primas se procede a diseñar la fórmula de trabajo y comprobar que los resultados obtenidos son los esperados. Finalmente se debe realizar una serie de ensayos donde se identifique la variación de las características de la mezcla en función de la variación final del contenido de ligante.

1. Caracterización y tratamiento de la mezcla envejecida

Inicialmente hay que intentar conocer en profundidad el material que se va a emplear como material fresado. Esta es una de las cuestiones más importantes, ya que el fresado entra a formar parte del producto final en un porcentaje muy elevado. Para ello se pueden hacer testigos, identificando los tipos de material que se encuentran en la obra, contenidos de ligante, granulometrías, características del ligante envejecido y de los áridos recuperados, lo que nos dará información para poder definir el proceso de obtención de fresado y su posterior tratamiento.

Para poder obtener un material fresado suficientemente representativo es conveniente obtener varias muestras de fresado previas, empleando la misma fresadora

que se va a emplear durante la ejecución, ya que de las características de dicha maquinaria y de algunos parámetros de funcionamiento (tales como velocidad de avance, tipo de tambor de fresado, ancho de trabajo...) van a depender algunas de las características importantes del material fresado, como el contenido en finos o la granulometría final obtenida.

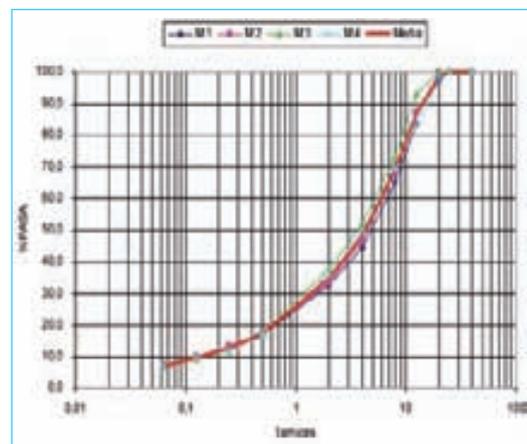
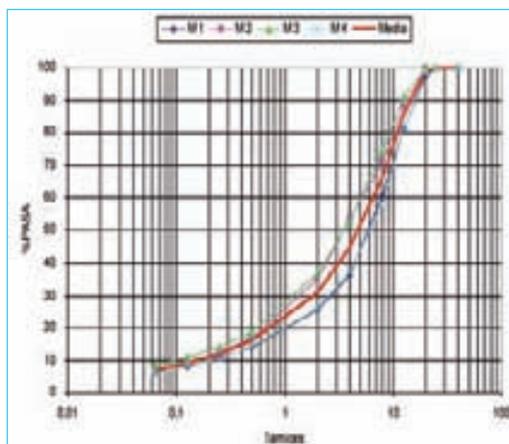


Figura 2. Granulometrías de material fresado. Diferentes niveles de homogeneidad.

Una vez obtenidas las muestras, se deben caracterizar para obtener las granulometrías del árido del fresado, el contenido de ligante de la mezcla envejecida y las características básicas de este betún.

Del análisis de los resultados obtenidos se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Caracterización del ligante recuperado. Es posible que existan en el fresado diferentes grados de envejecimiento, medidos a partir de la penetración y del ensayo del anillo y bola, cuestión que se deberá tener en cuenta con posterioridad, a la hora de diseñar el ligante nuevo a incorporar.
- Las curvas granulométricas tras la extracción de ligante de las mezclas, donde deberemos analizar su homogeneidad así como si es posible ajustar las curvas o no con los materiales obtenidos.
- También es importante conocer el contenido de ligante de las mezclas fresadas, así como su homogeneidad en el producto obtenido del fresado, ya que variaciones importantes del mismo pueden generar problemas de exudaciones, contenido de huecos de las mezclas, deformaciones plásticas e incluso falta de ligante en algunos casos, si no se tienen en cuenta dichas variaciones.
- Se deben caracterizar los áridos recuperados para comprobar que cumplen con las características requeridas.

En los cuadros anteriores se pueden observar, a modo de ejemplo, los resultados obtenidos en una obra realizada, donde se observan diferentes

niveles de homogeneidad del producto fresado, tanto en granulometría como en contenido de ligante, así como diferencias de envejecimiento del ligante en función de la zona de la obra de donde fue obtenido. Este hecho tiene que ser tenido en cuenta para evitar que afecte a la homogeneidad de la mezcla bituminosa fabricada.

Existen diferentes posibilidades de actuación sobre el fresado, y también en su proceso de obtención, para conseguir un producto más homogéneo. Algunas de las medidas a tomar se describen a continuación:

Estudio pormenorizado de la mezcla a fresar y selección de tramos y capas homogéneas

En el gráfico anterior se pueden observar diferentes tipos de mezcla a fresar, así como también diferentes espesores de cada tipo de mezcla. Si, además, se combina esta información con la obtenida de contenidos de ligante de las diferentes capas, las características del ligante recuperado, se pueden obtener tramos homogéneos de material, que se deben fresar independientemente y almacenar de forma separada, siempre que sea posible. Una posibilidad es el fresado en dos capas, con diferentes espesores, en función de las características de las mezclas a recuperar.

	1ª CAPA	2ª CAPA
% BETÚN S/M	4.20	3.85
% BETÚN S/A	4.40	4.00

Tabla 1. Contenidos de ligante de diferentes zonas de fresado.

	1ª CAPA		2ª CAPA	
	GRUPO 1	GRUPO 2	GRUPO 1	GRUPO 2
Penetración	16	8	14	8
Anillo/Bola	67	76	65	73

Tabla 2. Caracterización del ligante obtenido del fresado.

Homogeneización previa mediante mezclado o/y separación por tamaños

Otra posibilidad para obtener un producto más homogéneo es la de realizar una mezcla previa del material que se va obteniendo. También es posible separarlo mediante cribado en varios tamaños (generalmente dos), lo que habitualmente mejorará la homogeneidad.

Las medidas comentadas anteriormente pueden aplicarse de forma conjunta, obteniéndose un producto de fresado homogéneo que afectará de forma muy reducida a la variabilidad de los resultados obtenidos en la mezcla final.

2. Caracterización de los áridos nuevos

Para poder llegar a preparar la fórmula de trabajo es necesario conocer cuales son las características de los áridos nuevos que se van a emplear. Este punto es idéntico en cualquier proceso para la preparación de las fórmulas de trabajo convencionales y no presenta diferencias destacables en relación con las mismas.

3. Definición del contenido de ligante objetivo en las mezclas finales

Para poder establecer de forma adecuada cuáles han de ser las características del ligante nuevo a incorporar en la mezcla es necesario conocer las características del ligante final en la mezcla reciclada, el porcentaje de fresado en la mezcla, el contenido de ligante en el fresado (en función de la capa se podrá tener un contenido u otro), las características del ligante envejecido y el porcentaje de ligante final en la mezcla reciclada.

Por ello, y llegados a este punto, es absolutamente necesario definir cual va a ser el contenido de betún objetivo en las mezclas recicladas.

Para abordar este punto se encuentran dos posibles metodologías, las cuales se van a describir a continuación.

- El primer método consiste en realizar un estudio completo, para establecer el ligante óptimo en función de las características de la mezcla final diseñada a partir de los materiales que se emplearán, incluyendo el fresado tal y como se obtiene de la obra. Al establecer los diferentes contenidos de ligante a los que realizar

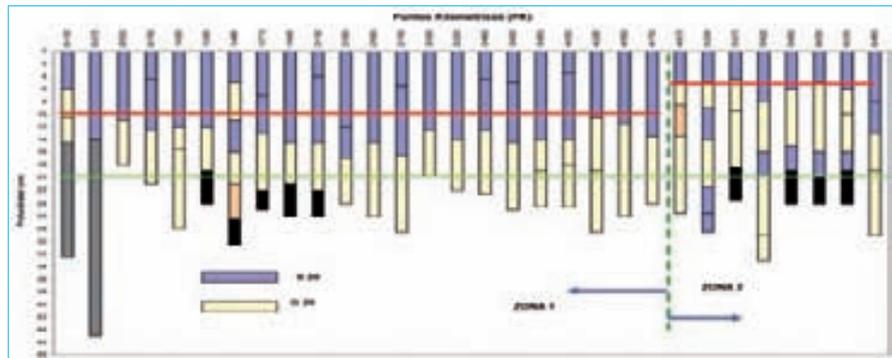


Figura 3. Campaña previa de testigos y tramitación.

el estudio, se produce una variación entre los porcentajes de betún nuevo y envejecido, con lo que varían las características del betún final en la mezcla; para que las características del betún final en la mezcla sean constantes para cada contenido de betún, se deberá añadir en cada punto un ligante nuevo diferente a fin de obtener en la mezcla final un betún de las características que se busca, lo que presenta la dificultad de tener un abanico muy grande de ligantes nuevos.

- Otra forma posible de obtener el ligante objetivo en la mezcla final es seguir el razonamiento que establece que debido a que el ligante final debe tener unas determinadas características, si realizamos el estudio con los áridos nuevos y los procedentes del fresado, eliminando el betún envejecido, con un betún nuevo con las características del que se quiere obtener, se podrá establecer el ligante óptimo para las mezclas en estudio y que será el que se empleará para definir de forma adecuada el ligante nuevo.

Para seleccionar el ligante objetivo en las mezclas se deben tener en cuenta los siguientes criterios:

- Que las características de la mezcla obtenidas cumplan con las especificaciones establecidas.



Foto 1. Fresado en dos capas.

FRACCIÓN	DESCRIPCIÓN	REACTIVIDAD QUÍMICA	FUNCIÓN PRINCIPAL	GRUPO AL QUE PERTENECE
Asfaltenos (As)	Productos de condensación. Presentan el mayor Peso Molecular	Baja	Agente de estructura	Asfaltenos
Bases nitrogenadas (Polares) (N)	Componentes nitrogenados de los maltenos	Alta	Peptizante	Maltenos
Primeras Acidafinas (A1)	Hidrocarburos o Resinas aromáticas	Alta	Disolvente	Maltenos
Segundas Acidafinas (A2)	Hidrocarburos Nafteno Aromáticos	Baja	Disolvente	Maltenos
Saturados (P)	Hidrocarburos saturados o Parafinas	Baja	Gelificante	Maltenos

Tabla 3. Componentes del betún.

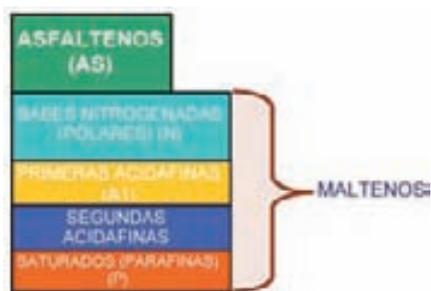
- Introducir en la mezcla final el mayor porcentaje de ligante posible, que nos dará como resultado un mayor porcentaje de ligante nuevo, intentando regenerar el ligante envejecido al máximo.

4. Definición del ligante nuevo

Como se ha mencionado anteriormente el reciclado consiste en reutilizar un material que ha estado en servicio durante varios años mediante la incorporación de un nuevo material que le restituya las características iniciales.

Para ello se realiza un análisis de las deficiencias del ligante envejecido del pavimento a reciclar y se prepara un ligante adecuado para corregir dichas deficiencias; este método se basa en que las causas que producen el envejecimiento del betún son de naturaleza fisicoquímica produciendo una alteración de su composición química y por tanto su estructura coloidal poniéndose de manifiesto en un endurecimiento y una pérdida de sus características mecánicas y aglomerantes.

Es posible obtener las características físicas del betún final en la mezcla con la adición de diferentes tipos de ligante nuevo, por lo que se debe comprobar también el nivel de rejuvenecimiento del ligante desde el punto de vista químico.



La influencia de los maltenos en la estabilidad del betún frente a la oxidación se establece mediante la denomina-

da Relación de Reactividad Química (CRR) o parámetro de durabilidad

$$CRR =$$

que es la relación entre los componentes más reactivos de los maltenos y los menos reactivos. El CRR tiene que ser suficientemente alto para dispersar los asfaltenos pero no demasiado alto para evitar su disolución. Los valores adecuados para este parámetro son los comprendidos entre 0,4 y 1,5.

La estabilidad coloidal del betún se estima mediante el Índice de inestabilidad coloidal

$$IC =$$

que relaciona los componentes sólidos presentes en el sistema (Asfaltenos y Parafinas) con los componentes líquidos dispersantes. En los betunes de Penetración este factor presenta valores inferiores a 1 y la acción química y compatibilidad del rejuvenecedor mediante la relación

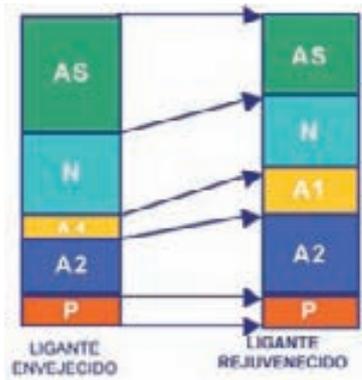
$$C =$$

debe presentar valores superiores a 0,5. Si fueran menores, indicaría un bajo contenido en bases nitrogenadas (agente peptizante) o un alto contenido en parafinas que podría suponer un riesgo de exudación de las mismas.

La composición del ligante nuevo se debe ajustar de tal forma que en el betún obtenido se cumplan simultáneamente los valores requeridos por los tres Índices.

En las siguientes tablas pueden observarse, como ejemplo, algunos resultados obtenidos en el análisis químico de betunes recuperados.

A partir de los resultados obtenidos para el ligante envejecido, así como de los porcentajes finales de ligante en la mezcla nueva, del porcentaje de fresado en la mezcla y de los porcentajes de ligante en el fresado, se definirán las características químicas del ligante nuevo a incorporar a la mezcla, para que el resultado final sea el adecuado.



En el esquema anterior se puede observar cual sería el objetivo de la incorporación de ligantes nuevos a la mezcla envejecida, intentando reducir el porcentaje de asfaltenos y mejorando los parámetros de reactividad química y de estabilidad coloidal.

Para analizar el comportamiento de los betunes con rejuvenecedores en la recuperación de los ligantes envejecidos, en el Proyecto Fénix se realizó un estudio en el que, a partir de ligante recuperado de material fresado, se obtuvieron diferentes ligantes mediante la incorporación de betunes nuevos y rejuvenecedores. En el cuadro adjunto se pueden observar los cuatro betunes nuevos empleados. Para comprobar el comportamiento frente al envejecimiento de los betunes recompuestos, se les aplicaron dos niveles de envejecimiento, representados por el RTFOT (Rolling Thin Film Over Test) y por el PAV (Presion Vessel Ageing). El primero representa un envejecimiento rápido, asimilable al que se produce en el ligante en el proceso de mezclado del betún en la fabricación, y en el transporte y puesta en obra. El segundo representa el efecto de oxidación y acción de los rayos ultravioleta que afectan al betún en servicio.

Como conclusión del estudio, tal y como se puede observar en los cuadros y gráficos adjuntos, se puede decir que el efecto de la incorporación del rejuvenecedor no sólo transforma el betún viejo en un betún recompuesto con características similares a un betún nuevo, sino que además le aporta una mayor resistencia al envejecimiento tanto a corto como a largo plazo. Es por ello importante considerar el empleo de dichos rejuvenecedores para asegurar un buen funcionamiento en servicio de las mezclas recicladas, tanto a corto como a medio y largo plazo.

5. Comprobación de las características de las mezclas recicladas. Estudio de la susceptibilidad de la mezcla a las variaciones de ligante

Llegados a este punto y con todas las materias primas definidas, así como los porcentajes de cada una de ellas que forman parte de la mezcla final, se comprueba que, con la fórmula de trabajo prevista, se obtienen los resultados esperados. Además, para cada una de las

ENSAYO	NORMA	UNIDAD	BETÚN I	BETÚN II
Penetración, 25°C, 5s. 100g.	NLT-124	1/10mm	9	18
Punto de reblandecimiento	NLT-125	°C	74.5	65.4
Índice de penetración	NLT-181		0.1	-0.1
Composición por cromatografía de columna:	ASTM D-2006	%		
Asfaltenos			38.24	31.39
Polares			26.02	30.38
1ª Acidafina			7.86	7.87
2ª Acidafina			17.85	20.52
Saturados			10.03	9.84
Índices de Envejecimiento				
CRR			1,21	1,26
Ic			0,93	0,70

Tabla 4. Análisis de los betunes envejecidos.

B Betún A	50% betún Viejo - 50% betún 150/200
B Betún B	50% betún Viejo - 50% rejuvenecedor
B Betún C	50% betún Viejo - 50% betún 60/70
B Betún D	Betún 60/70

Tabla 5. Composición betunes estudiados.

	A&B (°C)	Penetración	IP	Δ AB (%)	Δ P ^o (%)
Betun A	54,2	63,0	0,4		
Bet A + RTFOT	64,0	26,0	0,5	10,1	55,6
Bet A + PAV	67,0	23,0	0,6	23,6	63,5
Betun B	53,7	52,0	-0,4		
Bet B + RTFOT	59,2	36,0	0,1	11,3	30,8
Bet B + PAV	62,2	31,0	0,4	16,9	40,4
Betun C	56,8	47,0	0,3		
Bet C + RTFOT	67,2	23,0	0,6	18,3	51,1
Bet C + PAV	75,2	21,0	1,7	32,4	55,3
Betun D	50,6	64,0	-0,5		
Bet D + RTFOT	60,8	33,0	0,2	20,2	48,4
Bet D + PAV	70,4	23,0	1,1	30,1	64,1

Tabla 6. Resultados de anillo y bola y penetración.

FABRICACIÓN Y PUESTA EN OBRA

Los procesos de fabricación y puesta en obra de las mezclas bituminosas recicladas en caliente en central no ofrecen grandes diferencias con respecto a las mezclas convencionales, aunque sí deben tenerse en cuenta algunos puntos, principalmente en la fabricación:

mezclas diseñadas se comprueba cuales son las modificaciones que se producen cuando varía sustancialmente el contenido de ligante final.

Realizando estas comprobaciones, se puede decir que la mezcla diseñada puede ser fabricada y aplicada en obra con amplio margen de seguridad de que va a tener un funcionamiento adecuado. A continuación se adjuntan, a título de ejemplo, los resultados obtenidos para una mezcla fabricada con el 50% de RAP en la mezcla reciclada y cuyo ligante nuevo fue un betún de penetración 110 (0,1mm) con rejuvenecedor, con un buen resultado después de 8 años de su puesta en servicio.

- Las plantas de fabricación deben estar adaptadas para la incorporación del RAP. Para altas tasas de RAP en mezcla las plantas continuas tienen una mejor adaptación, ya que las discontinuas necesitarían de un método para el precalentamiento del fresado (segundo tambor secador para el fresado), con la problemática que se puede generar en el manejo del RAP caliente.
- Hay que incrementar el tiempo de mezclado para homogeneizar la mezcla y que se produzca la transmisión de temperatura de forma adecuada entre el fresado y el árido caliente.

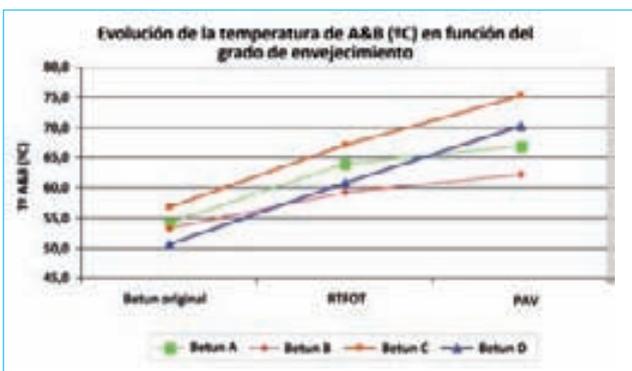
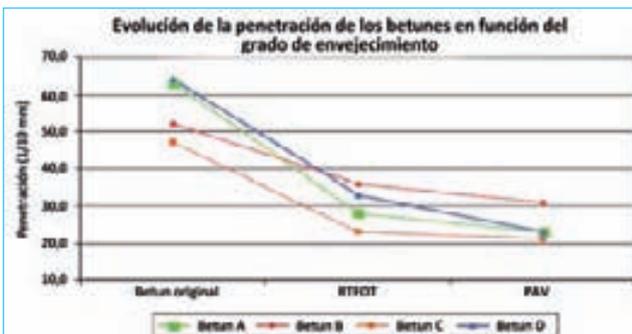


Figura 4. Evolución de características físicas de los ligantes.

CARACTERÍSTICAS	
Densidad	2.44 tn/m ³
Deformación	2.3 mm
Estabilidad	17 kN
Módulo Marshall	7.3
% Huecos en mezcla	5 %
% Huecos en áridos	15 %
Contenido de betún s.a.	4.5 %
Contenido de betún s.m.	4.3 %
Resistencia a deformaciones plásticas	V _{30/45} = 1.3 μm/min V _{75/90} = 0.7 μm/min V _{105/120} = 1.6 μm/min
Resistencia a la acción del agua (Inmersión /compresión)	80 %
Tracción indirecta (seco)	3.77
Tracción indirecta (húmedo)	3.42
% resistencia a la acción del agua	91 %
Módulo dinámico	7096 MPa
Ley de fatiga	Log ε = log 0.0008 - 0.145 log N

Tabla 7. Resumen de resultados mezcla bituminosa reciclada en caliente en central.

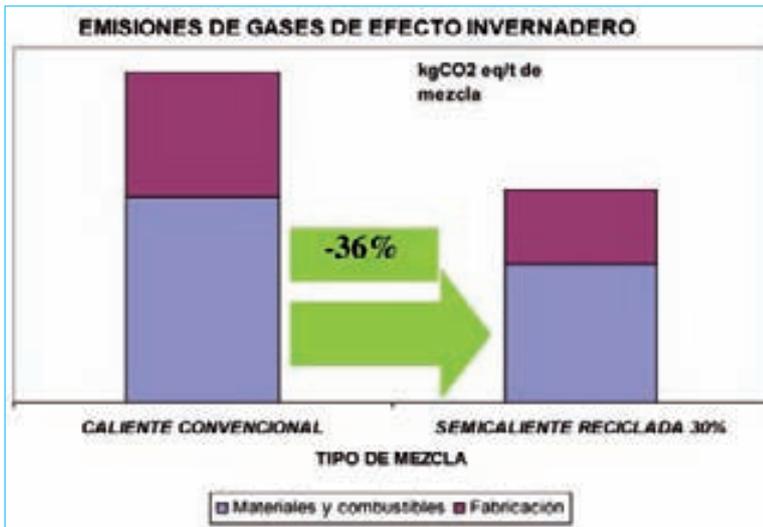


Figura 5.

la mezcla final se obtenga a la temperatura adecuada. Cuando los porcentajes de fresado son pequeños es sencillo incrementar la temperatura de los áridos vírgenes para que, por contacto se transmita el calor, el fresado se caliente y poder realizar la mezcla adecuadamente. Pero se puede observar que para porcentajes de humedad en el fresado de aproximadamente el 2%, suponiendo un porcentaje de fresado en mezcla del 50% y partiendo de la temperatura ambiente del mismo, los áridos vírgenes hay que calentarlos aproximadamente a 380°C.

Este hecho puede provocar diversos tipos de problemas, entre los que podemos destacar:

- Para porcentajes altos, alrededor del 50% de RAP, se hace necesario elevar mucho la temperatura de los áridos nuevos, lo que puede provocar un salto térmico muy importante entre los áridos y el ligante pudiendo producir un envejecimiento muy rápido del nuevo ligante en el proceso de fabricación de la mezcla.

Es quizás este último punto el que puede limitar la técnica con los medios actualmente disponibles, por lo que parece interesante plantear la posibilidad de adentrarse en nuevas tecnologías que permitan la fabricación de las mezclas recicladas a menor temperatura. Se plantea, por lo tanto, la posibilidad de fabricar mezclas bituminosas recicladas semicalientes.

MEZCLAS BITUMINOSAS RECICLADAS SEMICALIENTES

Aplicando los principios que se han citado anteriormente, se pueden diseñar mezclas prácticamente con cualquier porcentaje de fresado en la mezcla, teniendo en cuenta que tal y como se va incrementando dicho porcentaje, se van reduciendo los grados de libertad existentes para la dosificación de la mezcla.

Es posible en el laboratorio diseñar mezclas con el 80% de material fresado (e incluso más) consiguiendo que cumplan las características adecuadas.

Los principales problemas surgen en el proceso de fabricación. Cuando se incrementa mucho el porcentaje de fresado en la mezcla aparecen cuestiones importantes a tener en cuenta.

Una de las que se pueden considerar más limitantes es la de como elevar la temperatura del fresado para que

- Problemas en la instalación; al trabajar a temperaturas tan elevadas, el desgaste de la planta será mayor.
- En algunos casos hay áridos que no son capaces de soportar tales temperaturas, provocando problemas de calidad a la mezcla.
- Problemas de homogeneidad en la transmisión de calor a las partículas de fresado.
- Salto térmico entre la temperatura del betún y algunas partículas de árido nuevo.

Para estos porcentajes de fresado en la mezcla se podrían emplear instalaciones donde fuera posible calentar el fresado, con un doble tambor, aunque en este caso se presentan problemas de manejo del fresado a temperaturas más elevadas, donde el betún se pega a lo largo de toda la instalación, y donde, si no se actúa con mucha precaución, se puede estar oxidando de forma aún más importante el ligante envejecido, afectando a las características del producto final.

Así pues, se puede llegar a la conclusión que una de las limitaciones importantes es alcanzar la temperatura final de mezcla, sobre todo cuando se quieren alcanzar porcentajes de fresado en mezcla superiores a los que se han planteado anteriormente.

Un método que puede ser aplicado es el de las técnicas de "Mezclas semicalientes" para la fabricación de las mezclas recicladas, pudiendo bajar la temperatura de las mismas alrededor de 30°C, que transformado a la temperatura del árido virgen podrían ser entre 50 y 60°C.

Para la fabricación de este tipo de mezclas existen diferentes métodos, basados principalmente en la incorpo-

ración a la mezcla de aditivos que cambian la reología del betún, y que consiguen que a temperaturas más bajas la mezcla sea trabajable y compactable.

Entre los métodos que se suelen emplear podemos destacar los siguientes (sin ánimo de ser muy exhaustivos):

- Incorporación de tenso-activos.
- Incorporación de zeolitas: Aluminosilicatos con estructura de armazón que presenta agua en su interior, la cual se libera durante el proceso de mezclado aumentando así la superficie específica del betún y por tanto facilitando la fabricación a menor temperatura.
- Incorporación de ceras: Pueden ser sintéticas o naturales, y su función es la de reducir la viscosidad del betún a temperaturas superiores a las de fusión de las ceras (alrededor de 100°C), solidificando cuando la temperatura es inferior a la de solidificación y aportando a la mezcla mayor cohesión, incrementando la temperatura de reblandecimiento y el índice de penetración del ligante.

Pues bien, es posible, aplicando estas técnicas, fabricar mezclas recicladas con porcentajes elevados de fresado, reduciendo de forma importante las temperaturas de los áridos vírgenes, consiguiendo principalmente las siguientes ventajas técnicas:

- Se evita el problema de elevar tanto la temperatura de los áridos nuevos, evitando problemas en los mismos y en la instalación.
- Existe un menor salto térmico entre el árido nuevo y el fresado, realizándose más fácilmente la homogeneización del producto, con un menor envejecimiento del ligante.

Estas ventajas pueden hacer que se mejoren las condiciones de fabricación para mezclas con el mismo porcentaje de fresado, o también, mantener las condiciones de temperatura cuando se incrementa el porcentaje del mismo.

También es importante destacar las ventajas ambientales de esta técnica, que al combinar la incorporación de RAP con la fabricación a menores temperaturas es una solución ambientalmente destacable.

Entre las ventajas ambientales destacan, además de la reducción en el consumo de materias primas, la dismi-

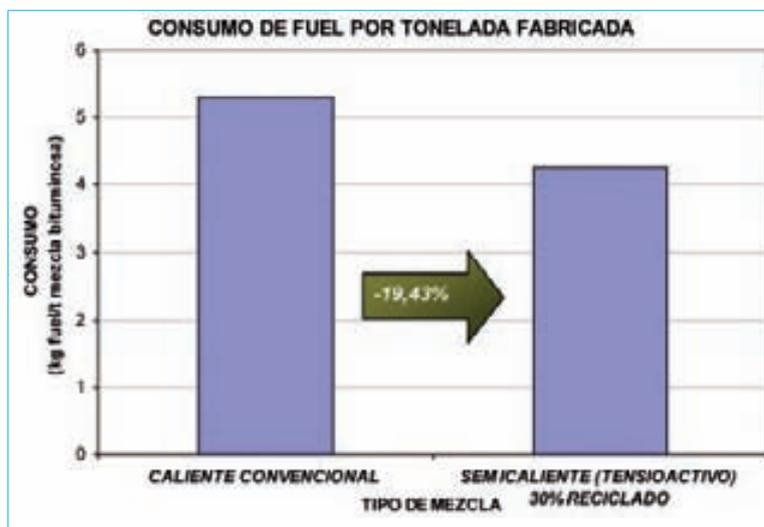


Figura 6.

nución de consumo energético durante la fase de fabricación, con una menor emisión de gases a la atmósfera.

Todas estas cuestiones han sido estudiadas en el Proyecto Fénix, con la herramienta del Análisis del Ciclo de Vida, (ACV) la cual se emplea para evaluar los efectos ambientales asociados a un producto, proceso o actividad, mediante la cual se pueden identificar y cuantificar la energía, los materiales usados y los residuos y emisiones producidos. Como consecuencia de ello, permite identificar y evaluar oportunidades de actuación medioambiental. El análisis incluye el ciclo completo del producto, proceso o actividad, abarcando la extracción y procesado de la materia prima, fabricación, transporte y distribución, uso, reutilización, mantenimiento, reciclado y eliminación final. El uso de la herramienta está normalizado por la serie de normas internacionales ISO 14040 (ISO 14040:2006; ISO 14044:2006).

El Análisis del Ciclo de Vida permite estudiar sistemas completos, o subsistemas dentro de un proceso, realizando comparaciones entre diferentes técnicas, dando como resultado qué técnicas son ambientalmente más sostenibles de entre las estudiadas.

Existe una forma de expresar las categorías de impacto en un indicador o resultado único que se denomina Ecopunto.

Para ofrecer una visión de conjunto, este indicador puede resultar bastante gráfico, a la hora de comparar soluciones; así pues, para nuestro caso según este indicador, las mezclas recicladas semicalientes ofrecen una mejora en ecopuntos de aproximadamente un 25%.

Otra referencia muy común, es establecer una comparativa de las emisiones de gases de efecto invernadero. En este caso se consigue una reducción en las

emisiones de un 36 % en Kg CO₂ eq/Tm de mezcla, considerando todo el proceso; incluyendo la prefabricación de las materias primas y la fabricación de la mezcla asfáltica.

Por otra parte, si lo analizamos desde el punto de vista energético y solo para el proceso de producción en la planta de fabricación de la mezcla asfáltica, podríamos decir que la fabricación de esta mezcla supone un ahorro energético traducido a toneladas de fuel consumido por tonelada de mezcla fabricada de un 19%.

En definitiva, es una técnica que hay que tener en cuenta, tanto desde el punto de vista técnico como ambiental.

CONCLUSIONES

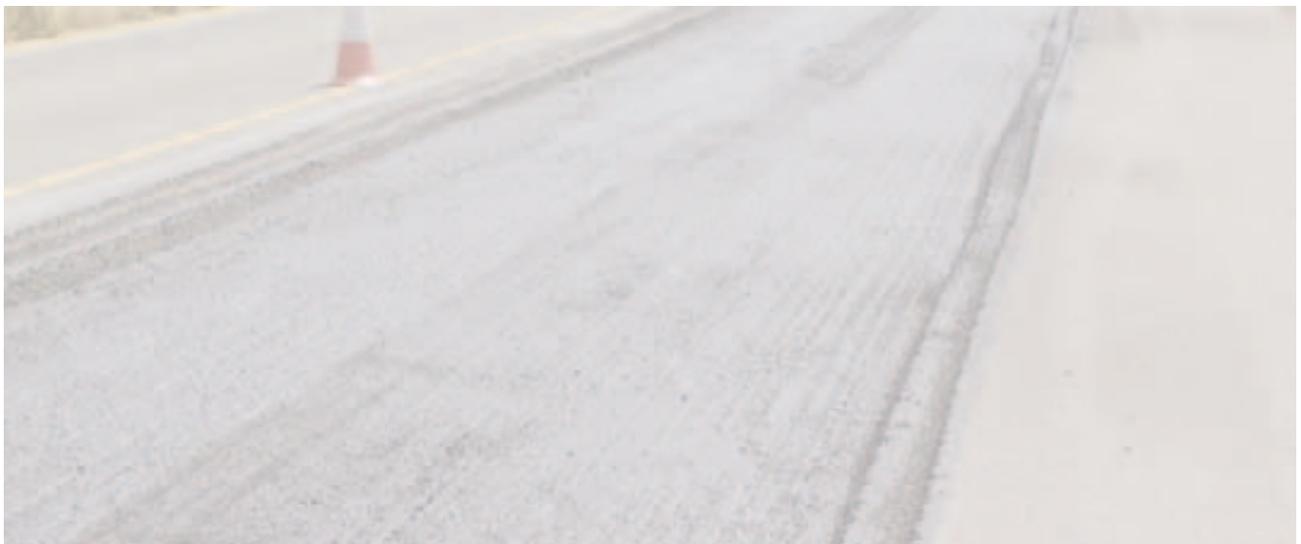
Tras el análisis de cada uno de los puntos tratados podemos obtener las siguientes conclusiones:

- Para obtener unos resultados finales adecuados es fundamental realizar una buena planificación inicial de la obra, estudiando en profundidad los materiales a reciclar, preparando adecuadamente la fórmula de trabajo.
- Para obtener el ligante óptimo de la fórmula de trabajo es importante tener en cuenta que en función del ligante nuevo y el envejecido, así como sus características y las variaciones de porcentajes en el fresado, las características finales del ligante obtenido variarán, teniendo que establecer una metodología para obtener dicho contenido óptimo de ligante, así como las características del betún nuevo con rejuvenecedores.

- Las características obtenidas en la mezcla final, con elevados porcentajes de fresado, son similares a las de una mezcla convencional.
- Hay que tener en cuenta que conforme se va incrementando el porcentaje de fresado en la mezcla final, los grados de libertad que se poseen a la hora de diseñar la fórmula de trabajo se reducen, pues un elevado porcentaje del ligante ya viene fijado, así como también el porcentaje de polvo mineral que se puede aportar, y también la granulometría de los áridos a emplear, encontrándonos con limitaciones que vendrán de las propias características del fresado.
- Es posible resolver en parte, y reducir siempre la problemática de fabricación de mezclas recicladas con alto porcentaje de fresado disminuyendo la temperatura de fabricación mediante la aplicación de las técnicas aplicadas a las mezclas semicalientes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- I Proyecto Fénix. Tarea 11. Reciclado en caliente. Sorigué, Sacyr, Pavasal, Repsol, Intrame.
- II Felipo, J; Mendoza, J. "Reciclado en caliente en central con alta tasa de fresado con el empleo de rejuvenecedores"- VII Congreso Nacional de Firmes 2006.
- III Proyecto Fénix. Tarea 12. Plantas de bajo consumo. Collosa, Sorigué, Intrame, Pavasal. 



Aplicación del ensayo Fénix a la caracterización y evaluación de mezclas bituminosas



Félix Edmundo PÉREZ JIMÉNEZ

Laboratorio de Caminos,
Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España

Gonzalo VALDÉS VIDAL

Departamento de Ingeniería de Obras Civiles,
Universidad de La Frontera, Temuco, Chile

Rodrigo MIRÓ

Laboratorio de Caminos,
Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España

Adriana MARTÍNEZ

Laboratorio de Caminos,
Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España

Ramón BOTELLA

Laboratorio de Caminos,
Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España

José AMORÓS

Laboratorio de Caminos,
Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España

RESUMEN

Uno de los fallos más habituales en las mezclas bituminosas de los firmes suele ser el causado por el fenómeno de fatiga. Sin embargo, la resistencia a la fatiga no es una propiedad que se considera frecuentemente en el diseño de las mezclas porque requiere de un equipamiento específico y suficiente tiempo para ensayar las mezclas de acuerdo con los procedimientos estandarizados.

Por ello, el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña lleva mucho tiempo estudiando esta propiedad en las mezclas bituminosas y ha desarrollado una serie de ensayos que permiten evaluar su cohesión y su resistencia a la fisuración. Se describen en este artículo las características más destacadas de estos estudios y en particular, la evolución de una serie de procedimientos que han convergido en el ensayo Fénix.

Se presenta a continuación un análisis de la sensibilidad y la repetibilidad del ensayo Fénix y un estudio sobre la correlación entre los parámetros de rigidez y deformación que se pueden determinar mediante este ensayo y los que definen las leyes de fatiga de las mezclas bituminosas. Finalmente, también se describen las curvas de estado obtenidas a partir de la variación de la energía de fractura, la rigidez y la tenacidad de las mezclas con la temperatura, lo que permite apreciar el cambio de comportamiento de dúctil a frágil de las mezclas ensayadas.

Palabras clave: *Ensayo Fénix, Mezclas bituminosas recicladas, Resistencia a la fisuración.*

PRESENTACIÓN

Las mezclas bituminosas son materiales cuya respuesta mecánica es muy diferente de otros materiales empleados en construcción, como hormigones y materiales metálicos, sin embargo, en su caracterización se parte en muchos casos de ensayos implementados para caracterizar estos materiales, que nada tienen que ver con la respuesta dúctil y flexible de una mezcla bituminosa. Este comportamiento dúctil y flexible de la mezcla bituminosa hace que se puede adaptar sin fisurarse a pequeños asentamientos del firme, debido a la consolidación y asiento de las capas granulares, y, sobre todo, que soporte sin fisurarse las dilataciones y contracciones del firme por esfuerzos térmicos. Quienes proporcionan estas propiedades a las mezclas son precisamente los ligantes bituminosos, que se caracterizan también por su respuesta dúctil, variando su comportamiento en función de la temperatura y el tiempo de aplicación de la carga, comportamiento visco-elástico.

Dentro de la Universidad Politécnica de Cataluña, un grupo de profesores vinculados a la Escuela de Ingenieros de Caminos de Barcelona y a su Laboratorio de Caminos, han llevado a cabo durante estos últimos años un trabajo de investigación dirigido al desarrollo de nuevos procedimientos y ensayos, que pudieran poner precisamente de manifiesto estas características específicas de las mezclas bituminosas. Estos nuevos ensayos han servido de base en muchos casos para desarrollar nuevos ligantes y mezclas bituminosas, ya que han permitido valorar mejor el efecto de aditivos y modificadores sobre las propiedades que realmente aportan estos, relacionadas más con la ductilidad, tenacidad y sensibilidad térmica de mezcla, que con su mayor o menor carga de rotura (característica básica de un hormigón).

El ensayo Fénix que se presenta en este artículo es un nuevo hito dentro de estas investigaciones. En su desarrollo han colaborado, técnicos e ingenieros de diferentes países Latinoamericanos, que se incorporaron a nuestro grupo de trabajo para la realización de sus estudios de doctorado y tesis doctorales. A muchos de ellos los conocimos o nos conocieron en los congresos del CILA.

Por otra parte, todos estos ensayos y líneas de investigación han sido presentadas de forma continua en todos los congresos organizados por el CILA desde el año 1999, 10º Congreso del CILA, en Sevilla, donde tuvimos la suerte de contactar con este congreso y, sobre todo, con las personas

y técnicos que lo organizan, que han conseguido crear, aparte de su calidad técnica, una atmósfera de amistad y camaradería, difícilmente encontrada en otros congresos. Son más de 32 comunicaciones presentadas. Animo a los nuevos responsables del CILA a continuar con la labor emprendida por el Dr. Jorge Agnusdei, a quien el grupo de investigación del Laboratorio de Caminos desea mostrar, desde estas páginas, su admiración y reconocimiento.

EVALUACIÓN DE LA COHESIÓN Y RESISTENCIA A LA FISURACIÓN DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS

Una de las líneas de investigación implementadas en el Laboratorio de Caminos ha sido analizar la cohesión proporcionada por el betún a las mezclas bituminosas, bien valorando su poder aglomerante, ensayo UCL, o a través de la energía empleada en su fisuración y fractura, energía de fractura, ensayos BTB, BTI y Fénix. El primer procedimiento, método UCL, publicado en el X Congreso CILA,^(i, ii, iii) se basa en medir el poder aglomerante del betún a partir de evaluar su capacidad para mantener los áridos unidos, cuando la mezcla árido-betún es sometida a un ensayo de pérdida por abrasión, ensayo Cántabro, Figura 1. El material granular de la mezcla son partículas de árido del mismo tamaño, 5-8 mm, unidas por la misma cantidad de betún, 4,5 % de peso s.a., y que durante el ensayo se van perdiendo en función de la mayor o menor ligazón proporcionada por el betún. Se trata de un ensayo normalizado para medir el poder aglomerante del betún, al igual que existen ensayos normalizados para medir la resistencia de los cementos a partir de morteros de la misma composición ponderal y tipo de arena. El procedimiento ha sido empleado con éxito para el desarrollo de betunes modificados, pues claramente ponen de manifiesto su mejor respuesta.

En ese mismo congreso se presentó un ensayo para evaluar la energía de las mezclas bituminosas sometidas a esfuerzos de tracción, ensayo BTB. En este ensayo se partió del compactador Marshall y se compactó la mezcla sobre unos soportes especiales que permitían aplicar un esfuerzo de tracción, Figura 2. El ensayo fue aplicado



Figura 1. Ensayo Cántabro.



Figura 2. Ensayo BTM.

un esfuerzo de tracción, Figura 2. El ensayo fue aplicado bajo carga monotónica, tesis de C. Fonseca^(v) y bajo carga cíclica, tesis de J. Cepeda^(v). Ambas tesis sirvieron para poner de manifiesto el comportamiento dúctil de las mezclas y como su deformación de rotura, tanto bajo carga monotónica como cíclica, se podría considerar como una característica de la mezcla, ya que las mezclas rompían en el ensayo de fatiga en el mismo nivel de deformación con independencia de la carga aplicada, y como esta deformación podía variar y aumentar notablemente con el tipo de ligante empleado, especialmente en el caso de betunes modificados.

Ambos procedimientos de ensayos, BTM y UCL, fueron considerados complementarios y fueron aplicados en la caracterización de betunes, mezclas y también de másticos bituminosos. Sobre este última tema desarrolló su tesis el profesor H. Bianchetto. Los resultados de estas investigaciones fueron presentadas en los congresos XI, XII y XIII del CILA, celebrados en Lima 2001^(vi, vii), Quito 2003^(viii) y San José^(ix, x).

Nuestra experiencia en el estudio y análisis del comportamiento de las mezclas bituminosas cada vez puso más de manifiesto la importancia que tiene evaluar su comportamiento dúctil en los ensayos de tracción y como este comportamiento dúctil define también su respuesta a la fatiga. Se pasó a implementar un nuevo ensayo de tracción directa, CTD, Figura 3, con el que se podía medir



Figura 3. Ensayo CTD.

mejor las tensiones y deformaciones en que estaba sometida la mezcla durante el ensayo y se relacionaron estos resultados con su comportamiento a fisuración por fatiga, y sus leyes de fatiga. Los resultados de este estudio fueron presentados en el XIV Congreso CILA en la Habana, 2007^(xi).

Nuevamente estos estudios pusieron de manifiesto la relación entre la respuesta de las mezclas en los ensayos de tracción y su comportamiento a fatiga. En particular, entre el comportamiento dúctil de la mezcla y su mayor rango de deformación en los ensayos de fatiga (mayor valor de c). Es decir, se puede evaluar la respuesta a fatiga de la mezcla a partir de ensayos más fáciles de rotura a tracción, pero para

ello es muy importante evaluar bien la rotura de la mezcla una vez que se ha iniciado su proceso de rotura, su curva esfuerzo-deformación tras la carga máxima de rotura. El ensayo de tracción directa resultaba excesivamente brusco y produce una rotura rápida cuando se ensayaban mezclas poco dúctiles. Por ello, se pensó en desarrollar un ensayo que permitiese evaluar el comportamiento de la mezcla durante su proceso de fisuración. Se analizaron los ensayos existentes, en particular los ensayos DC(T) y SCB, que estaban siendo usados en Europa y EEUU para evaluar la energía de fractura de las mezclas. Ambos son ensayos empleados para la caracterización de materiales metálicos y fueron aplicados en la medida de la resistencia a la fisuración y evaluación de la propagación de fisuras en materiales asfálticos^(xii, xiii). El primero fue desechado, pues aparte de lo laborioso que resulta en la preparación de las probetas, sólo puede usarse cuando la mezcla presenta una elevada rigidez, ensayos a bajas temperaturas, para evitar la deformación plástica de la mezcla y que los esfuerzos puedan ser transmitidos adecuadamente a la zona de fisuración.

El ensayo SCB, más usado que el DC(T), presenta también problemas cuando la mezcla no es rígida, pues entonces la distribución de tensiones en la zona de carga se modifica y también se producen deformaciones y cambios de esfuerzos. Además, para que el ensayo se pueda realizar en deformación controlada y así obtener mejor la curva de rotura tras pico, es necesario poner un extensómetro en la parte inferior de la probeta que es el que tiene que controlar el ensayo. Se necesita una prensa especial cuyo movimiento del plato pueda ser controlado por el extensómetro. Por ello se pensó en desarrollar un ensayo de tracción que se aplica a deformación controlada y de fácil implementación, ensayo Fénix^(XIV, XV, XVI).

ENSAYO FÉNIX

El ensayo Fénix consiste en someter una probeta de forma semicircular a un proceso de rotura a tracción a partir de aplicar una deformación de tracción de 1 mm/min a las bases metálicas a las que han sido pegadas la superficie plana de la probeta, Figuras 4 y 5. En el esquema de la figura se indica también el corte de 3 cm de anchura y 3-4 cm de profundidad que es realizado en la probeta para indicar la sección de rotura. El ensayo fue desarrollado y puesto a punto por el laboratorio de Caminos de la UPC dentro del proyecto de investigación Fénix, llevado a cabo por un consorcio de empresas y centro de investigación coordinados por ASEFMA dentro del programa CENIT del Ministerio de Industria.

Durante el ensayo se obtiene la curva esfuerzo-deformación y se calculan los siguientes parámetros que caracterizan el comportamiento de la mezcla:

σ_{max} = Tensión máxima de rotura, MPa.

IRT = Índice de rigidez, pendiente de la curva de rotura, entre el 25 y el 50% de la carga máxima, en kN/mm.

W_D = Trabajo de rotura, integral de la curva de rotura hasta un valor para la carga residual tras la rotura de 0.1 kN, en kN·mm

G_D = Energía disipada, Trabajo de rotura por unidad de superficie, en J/mm².

I_T = Índice de tenacidad, energía disipada tras inicio de la rotura de la probeta, multiplicado por la deformación

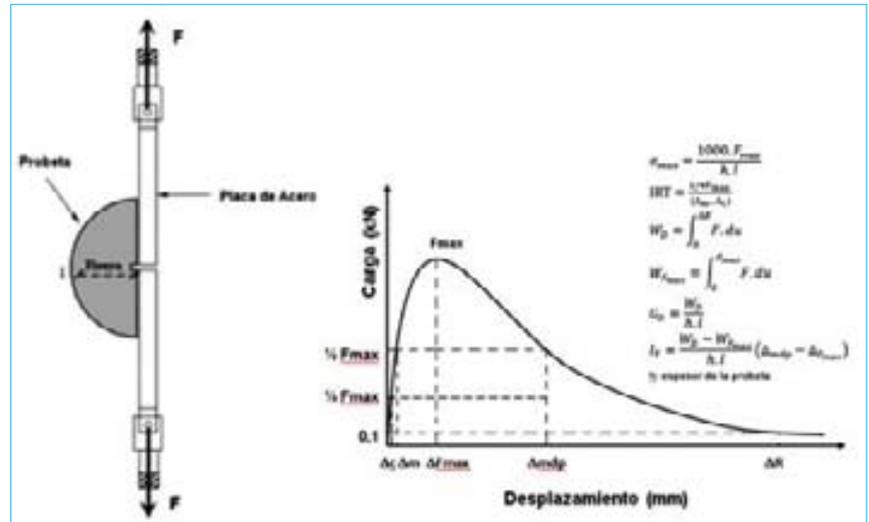


Figura 4. Esquema ensayo Fénix y curva carga-desplazamiento con ecuaciones.

experimentada por la probeta entre la carga máxima y el 50% de la carga máxima en la curva de descenso, en J/mm.

En la Figura 4 se han recogido las fórmulas para el cálculo de todos estos parámetros a partir de la curva esfuerzo-deformación que se determina en el ensayo.

La tensión máxima de rotura, el módulo de deformación y la energía disipada en la fractura son los parámetros que son considerados normalmente en la caracterización de la resistencia a la fractura de los materiales, ya relacionamos con esfuerzo y la energía usada en la rotura con la mayor o menor cohesión de los materiales. Pero en el caso de las mezclas bituminosas con el fin de valorar su respuesta dúctil se ha establecido un índice de tenacidad en el que tiene en cuenta la energía disipada en la zona decreciente de la curva por la deformación en que la mezcla mantiene su resistencia. Es decir, diferenciar las mezclas o materiales frágiles que suelen tener una gran resistencia de rotura y por consiguiente una elevada energía de fractura, pero con una caída brusca de la curva de rotura y muy pequeña deformación, con los materiales dúctiles, que con una menor energía mantienen su resistencia en la curva de rotura y presentan una respuesta más dúctil.

1. Repetibilidad y sensibilidad del Ensayo Fénix

Una de las principales ventajas del procedimiento del ensayo Fénix son los buenos grados de repetibilidad y sensibilidad, entregados en sus resultados.



Figura 5. Ensayo Fénix.

Los resultados estadísticos obtenidos de la repetibilidad y sensibilidad de los principales parámetros entregados por el ensayo en más de 30 series de 3 probetas c/u, evaluando diferentes tipos de mezclas, ligantes y temperaturas de ensayo, indicaron lo siguiente:

Para la carga máxima, F_{max} , se observan valores del coeficiente de variación bastante buenos, indicando una variación global promedio de 8,5% para todas las mez-

clas evaluadas a las distintas temperaturas de ensayo, apreciándose una tendencia a aumentar los valores a medida que aumenta la temperatura.

Para el índice de rigidez a tracción, IRT, se observa un coeficiente de variación promedio de 12,3%, lo que supone una buena repetibilidad para este parámetro. Al igual que para la carga máxima, se observa que los coeficientes de variación aumentan al aumentar la temperatura de ensayo.

En la evaluación de la repetibilidad del desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico, Δmdp , se observan coeficientes de variación bastante similares para las tres temperaturas consideradas, con un valor promedio de 11,9%, lo que indica una buena repetibilidad del parámetro calculado.

Finalmente, para la energía disipada, GD, se observa un coeficiente de variación de 16%. En general, los coeficientes de variación para este parámetro del ensayo Fénix, se encuentra en el rango de variabilidad comparado con los señalados en la literatura por Wagoner et al.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO ANOVA		CARGA MÁXIMA	ÍNDICE RIGIDEZ A TRACCIÓN	DESPLAZAMIENTO 50% FMAX DP	ENERGÍA DISIPADA
		FMAX	IRT	ΔMDP	GD
		(KN)	(KN/MM)	(MM)	(J/M ²)
Efecto del tipo de ligante y temperatura de ensayo					
Tipo de ligante		Sí	Sí	Sí	Sí
T° de ensayo		Sí	Sí	Sí	Sí
Interacción		Sí	Sí	Sí	Sí
Efecto del contenido de ligante y temperatura de ensayo					
B60/70	Cont. de ligante	No	Sí	Sí	Sí
	T° de ensayo	Sí	Sí	Sí	Sí
	Interacción	No	Sí	No	No
B40/50	Cont. de ligante	No	No	Sí	Sí
	T° de ensayo	Sí	Sí	Sí	Sí
	Interacción	Sí	No	Sí	Sí
B13/22	Cont. de ligante	No	Sí	Sí	Sí
	T° de ensayo	Sí	Sí	Sí	Sí
	Interacción	No	No	Sí	Sí

Tabla 1. Sensibilidad de los parámetros Fénix

MEZCLAS	TEMPERATURA (°C)	MÓDULO DINÁMICO (MPa)	LEY DE FATIGA	R ²
G 20 B-60/70	20	2410	$\epsilon=0,0041N^{-0,2124}$	0,95
S 20 B-60/70	20	3229	$\epsilon=0,0035N^{-0,2061}$	0,85
G 20 B-13/22	20	8750	$\epsilon=0,0012N^{-0,1731}$	0,77
S 20 B-13/22	20	11556	$\epsilon=0,0011N^{-0,1638}$	0,78
G 20 B-60/70	5	9293	$\epsilon=0,0013N^{-0,1684}$	0,62
S 20 B-60/70	5	13520	$\epsilon=0,0011N^{-0,1662}$	0,68
G 20 B-13/22	5	18623	$\epsilon=0,0007N^{-0,1383}$	0,54
S 20 B-13/22	5	23848	$\epsilon=0,0006N^{-0,1277}$	0,87
S20 R60	20	11212	$\epsilon=0,0008N^{-0,1458}$	0,68
S12 R40	20	9671	$\epsilon=0,0011N^{-0,1751}$	0,96

Tabla 2. Módulo dinámico y leyes de fatiga de las mezclas estudiadas.

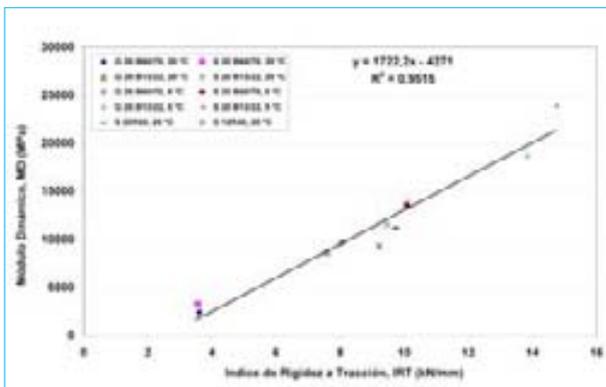


Figura 6. Correlación entre Módulo Dinámico del ensayo de fatiga a flexotracción y el índice de rigidez a tracción del ensayo Fénix.

en el año 2005 para las geometrías de los ensayos SE(B) (3-28%), DC(T) (4-25%) y SCB (15-34%).

La sensibilidad del ensayo Fénix fue evaluada mediante un análisis de varianza - ANOVA - de los resultados de los mismos parámetros principales obtenidos en las mismas pruebas experimentales. En este análisis se evaluó, en una primera parte, el efecto del tipo de ligante, temperatura de ensayo y la interacción entre ambos factores en cada uno de los principales parámetros entregados por el ensayo Fénix. Posteriormente, fue evaluado el efecto del contenido de ligante, temperatura de ensayo y la interacción entre estos dos factores en los resultados de los mismos principales parámetros, cuyos resultados se observan en la Tabla 1.

RELACIÓN ENTRE LA DUCTILIDAD Y LA RESPUESTA A LA FATIGA DE LOS MATERIALES BITUMINOSOS

El ensayo Fénix puede ser explicado, como de hecho se hace, con los ensayos de fractura SCB y DC(T), en la determinación de la resistencia a la fisuración y energía disipada en la fractura de las mezclas bituminosas. Estos resultados evalúan la cohesión proporcionada a la mezcla por el betún y mástico bituminoso. En principio parece conveniente mezclas de una elevada cohesión, con valores de resistencia y energía de fractura cuanto más altos mejor. Pero mezclas con una elevada resistencia y energía de fractura pueden resultar muy rígidas y para que se comporten bien a fatiga, necesitan tener una

respuesta dúctil con una elevada deformación en rotura y un elevado índice de tenacidad, tal y como se pone de manifiesto en los resultados aquí incluidos en donde se relacionan los resultados de fatiga a flexotracción y Fénix llevados a cabo en mezclas de diferentes características. Se han ensayado dos mezclas tipo AC 20 base G fabricadas con dos betunes de penetraciones muy diferentes, uno muy duro, B13/20, y otro más blando, B60/70, que fueron ensayados a dos temperaturas, 5 y 20°C. También se han ensayado otras dos mezclas tipo AC 20 intermedia S, fabricadas también con los dos tipos de betunes mencionados y ensayados también a 5 y 20°C. Por último, se han fabricado y ensayado a 20°C dos mezclas tipo AC 20 intermedia S y AC 12 intermedia S, con el 60 y el 40% del material reciclado (RAP). Las mezclas tipo S (semidensa) se caracterizan por tener un porcentaje de huecos alrededor del 4-6%, mientras que las tipo G son más porosas, con un contenido de huecos alrededor del 6-8%. El valor 20 y 12 indica el tamaño máximo del árido de naturaleza caliza.

En la Tabla 2 aparecen los parámetros de las leyes de fatiga de las diez mezclas, que han sido correlacionados con los parámetros obtenidos en el ensayo Fénix. Las mezclas que no tenían material reciclado fueron ensayadas en el ensayo Fénix a 5 y 20°C, mientras que las mezclas con RAP sólo fueron ensayadas a 20°C.

En primer lugar se ha relacionado el módulo obtenido en el ensayo de fatiga con el índice de rigidez (IRT) determi-

nado en el ensayo Fénix, para cada una de las mezclas y temperaturas ensayadas, Figura 6.

En este caso, las mezclas con menores rigideces (IRT) o módulos dinámicos (MD), se sitúan en la parte inferior de la recta de tendencia. A su vez, las mezclas con mayores rigideces o módulos, como el caso de las confeccionadas con el ligante de menor penetración, B13/22, ensayadas a una temperatura de 5 °C, se sitúan en la parte superior de la tendencia.

A continuación se estableció una correlación entre los parámetros de rigidez, IRT, y desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico, Δmdp , obtenidos del ensayo Fénix, y los parámetros de la ley de fatiga, pendiente y deformación en el ciclo 1 de la ley de fatiga, parámetros "b" y "a", respectivamente. En la Figura 7 se observa que las mezclas con una mayor rigidez, IRT, obtienen en el ensayo a fatiga una menor pendiente en la ley de fatiga y se sitúan en la parte inferior de la recta de tendencia. Por otra parte, las mezclas con rigideces bajas obtienen una mayor pendiente de la ley de fatiga situándose en la parte alta de la recta de tendencia, como es el caso de las mezclas fabricadas con el ligante de mayor penetración, B60/70, y ensayadas a la temperatura de 20 °C.

En la Figura 8 se observa cómo las mezclas que obtienen un mayor desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico en el ensayo Fénix, Δmdp , presentan una mayor deformación en el ciclo 1 en el ensayo a fatiga, como es el caso de las mezclas confeccionadas con los ligantes de mayor penetración, ensayadas a la temperatura de 20 °C. A su vez, las mezclas fabricadas con ligantes de menor penetración y ensayadas a bajas temperaturas se sitúan en la parte inferior de la línea de tendencia.

Un esquema descriptivo de las correlaciones expuestas en este apartado que permiten estimar el comportamiento a fatiga de las mezclas, se resume en la Figura 9.

Mediante las correlaciones determinadas en este estudio entre ambos procedimientos se demuestra que es posible estimar o predecir la repuesta a fatiga de las mezclas por medio de un procedimiento más sencillo. Una nueva ley de fatiga se podría estimar mediante los parámetros de entrada: índice de rigidez a tracción, IRT, y desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico, Δmdp , entregados por el ensayo Fénix.

A su vez, la buena correlación entre el módulo dinámico obtenido del ensayo de fatiga, MD, y el índice de rigidez a tracción del ensayo Fénix, IRT, permite

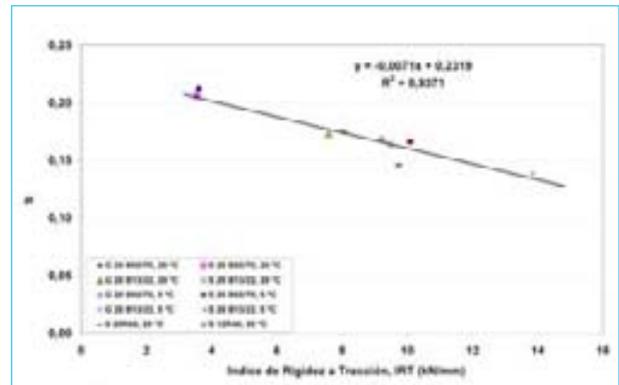


Figura 7. Correlación entre parámetro "b" de la ley de fatiga a flexotracción y el índice de rigidez a tracción del ensayo Fénix.

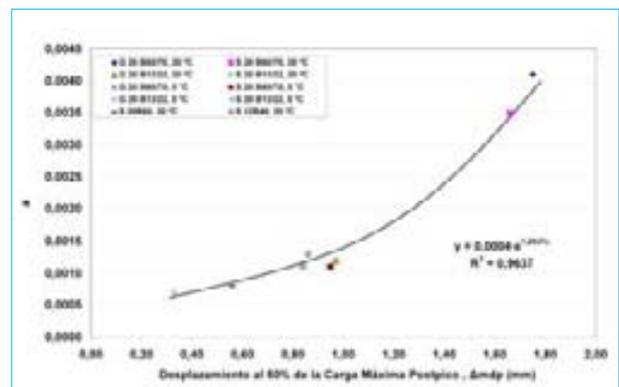


Figura 8. Correlación entre parámetro "a" de la ley de fatiga a flexotracción y el desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico del ensayo Fénix.

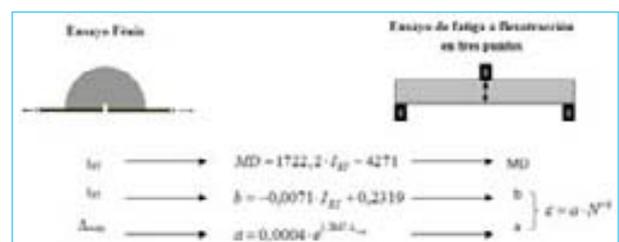


Figura 9. Correlaciones de los parámetros Fénix con los de la ley de fatiga a flexotracción.

dar a conocer el valor del módulo de una mezcla, que junto a la ley de fatiga, permite determinar el comportamiento de la mezcla frente a la acción del tráfico en los actuales métodos analíticos de diseño de pavimentos.

CURVA DE ESTADO

Los materiales bituminosos presentan una fuerte variación de sus propiedades dependiendo de la temperatura a que se encuentren. Normalmente se suele ensayar las mezclas a una determinada temperatura, relacionada con la que en principio pudiera resultar más negativa a la hora de determinar una

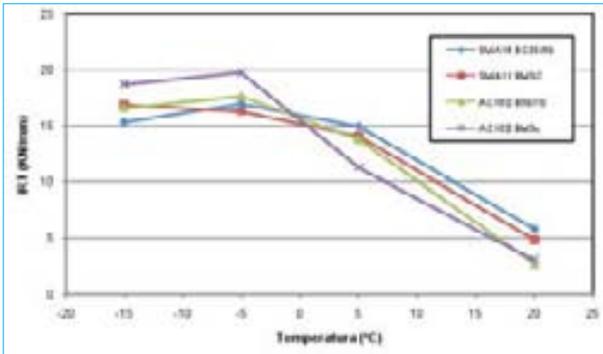


Figura 10. Índice de rigidez, IRT (kN/mm) vs temperatura (°C).

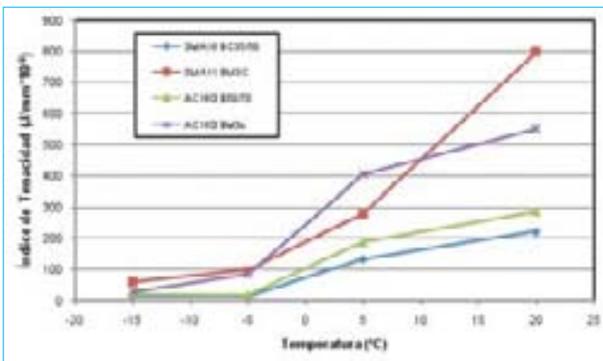


Figura 11. Índice de tenacidad (J/mm*10⁶) vs temperatura (°C).

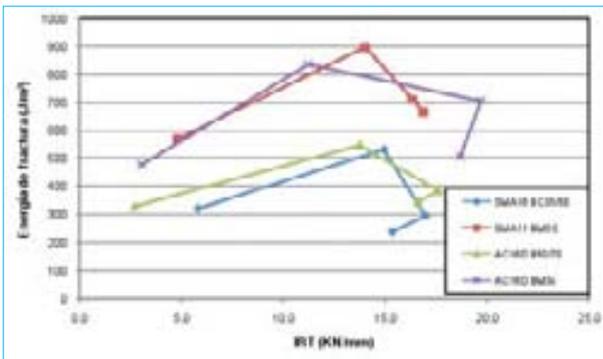


Figura 12. Energía de fractura (J/m²) vs índice de rigidez, IRT (kN/mm).

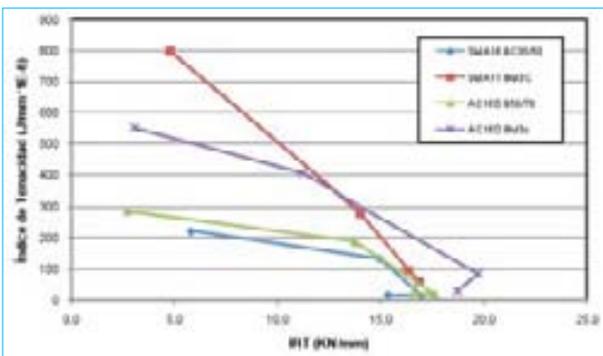


Figura 13. Índice de tenacidad (J/mm*10⁶) vs índice de rigidez, IRT (kN/mm).

propiedad. Así en los ensayos de deformaciones plásticas se suelen hacer los ensayos a alta temperatura, 60°C suele ser una temperatura convencional. Los ensayos de fatiga suelen hacerse a una temperatura intermedia, 20°C, y los ensayos por fractura térmica a bajas temperaturas. Tenemos propiedades puntuales de la mezcla a diferentes temperaturas, pero no sabemos cómo se va produciendo este cambio de comportamiento con la temperatura, lo que hemos denominado curva de estado. Esto puede hacerse de manera muy fácil si aplicamos el ensayo Fénix a distintas temperaturas. Esto ha sido realizado, tal y como se expone a continuación, en diferentes tipos de mezclas, lo que ha permitido poner de manifiesto el efecto que tanto el tipo de granulometría y composición de la mezcla, como el tipo de ligante, tienen en su respuesta. Los ensayos han sido realizados en un rango de temperatura de -15 a 20°C. En este rango de temperatura es cuando se produce el cambio de respuesta de la mezcla de un material rígido a un material dúctil y flexible. Es dentro de este rango de temperaturas donde tiene lugar la fisuración de la mezcla en el firme bien por tensiones térmicas, o por fatiga por la aplicación repetida de las cargas del tráfico, o bien, por combinación de ambos mecanismos de deterioro. A temperaturas superiores los problemas están asociados a las deformaciones plásticas de la mezcla y para este tipo de mecanismo resulta más útil aplicar los ensayos de deformaciones plásticas a altas temperaturas.

En las se representan para las cuatro mezclas seleccionadas la variación del índice de rigidez a tracción (IRT) y del índice de tenacidad con la temperatura. Dentro de las mezclas ensayadas hay dos de tipo hormigón bituminoso, AC, de granulometría continua y densa, D, y un tamaño máximo de árido de 16mm. La diferencia que hay entre estas dos mezclas es que una ha sido fabricada con un betún convencional, B 50/70, y la otra con un betún modificado. El contenido de ligante de ambas mezclas es similar, del 4,5%. Si se analiza la respuesta de estas mezclas se observa el gran efecto que tiene el ligante modificado para aumentar el índice de tenacidad de la mezcla, sobre todo, a las temperaturas más altas, 5 y 20°C. Pero es importante señalar que también a bajas temperatura el índice de tenacidad de la mezcla con betún modificado es más del doble que el del betún convencional. El efecto del tipo de ligante sobre el módulo es menor. Con ambos tipos de betunes se obtienen resultados similares a las diferentes temperaturas. Únicamente se aprecia una mayor susceptibilidad en el ligante modificado, que presenta mayor módulo a bajas temperaturas y es más bajo o similar a altas temperaturas.

Las otras dos mezclas ensayadas han sido de tipo SMA, Stone Mastic Asphalt, fabricada una con un betún caucho, BC 35/50, y la otra con un betún modificado, BM3C. Al igual que en el caso anterior, los ensayos ponen de manifiesto el efecto del tipo de betún para aumentar la tenacidad de la mezcla, en todo el rango de temperaturas ensayado, mientras que prácticamente no se aprecian grandes diferencias entre los módulos de las mezclas.

Si consideramos ahora el efecto del tipo de granulometría, densa o SMA, vemos que no tiene tanta influencia. Quizás, la mezcla SMA resulta más dúctil a altas temperaturas por su mayor contenido de ligante, 6%. Las diferencias de rigidez no son muy significativas, esto puede ser debido por tratarse de un módulo a tracción en donde el efecto del ligante es más significativo que la influencia que puede tener la granulometría de la mezcla. Además, estas granulometrías no son tan diferentes, pues ambas son densas, con un mayor contenido de árido fino la mezcla SMA.

En las Figuras 12 y 13 se ha representado la variación de la energía disipada y del índice de tenacidad frente al índice de rigidez. Se aprecia en la Figura 12 que inicialmente, al pasar de 20 5°C, aumenta el módulo y la energía de fractura; la mezcla aumenta su rigidez y mantiene su ductilidad. A partir de ese momento, al ir bajando la temperatura, la mezcla aumenta de rigidez y pierde ductilidad. Su rotura es más frágil y baja incluso su energía de fractura. También se observa el efecto que tiene el tipo de ligante para aumentar la energía de fractura de la mezcla, más que el cambio del tipo de granulometría.

La relación índice de tenacidad respecto al índice de rigidez muestra que al bajar la temperatura aumenta el índice de rigidez pero se produce una pérdida notable de su tenacidad. A bajas temperaturas las mezclas presentan una respuesta muy similar y aquí el efecto del tipo de ligante se nota mucho menos. Al pasar de -5 a -15°C se observa una ligera pérdida de módulo, que puede ser debido a las dispersiones del ensayo y proceso de medida, este valor debería mantenerse más o menos constante, pero lo que se aprecia claramente es la pérdida de ductilidad de todas las mezclas. A la temperatura de -15°C apenas se observan diferencias por efecto de la granulometría ni por efecto del ligante. Esto indica que si deseamos utilizar mezclas dúctiles a bajas temperatura deberíamos seguir investigando para usar otras mezclas y, en especial otros tipos de ligantes, quizás de menor penetración, que mantuviesen su flexibilidad y ductilidad a bajas temperaturas.

CONCLUSIONES

Una de las propiedades más importantes a considerar en el diseño de las mezclas bituminosas es su resistencia a la fisuración. Las mezclas bituminosas se caracterizan por tener un comportamiento dúctil en los procesos de fisuración.

Su fisuración se produce a unas deformaciones mucho más elevadas respecto a los materiales frágiles, tipo hormigón. Sin embargo, estas propiedades varían con la temperatura en que se encuentra la mezcla. Existen los parámetros que permiten caracterizar la respuesta de la mezcla entre los diferentes mecanismos que provoca su fisuración en el firme, bien sea por tensiones térmicas o por fatiga por cargas repetidas: su rigidez IRT y su tenacidad IT de fallo. Estos dos parámetros pueden obtenerse de forma muy sencilla mediante el ensayo Fénix.

Existe una clara relación entre estos dos parámetros obtenidos en el ensayo Fénix y el módulo complejo y los parámetros a y b obtenidos en los ensayos de fatiga. Sin embargo el ensayo Fénix resulta fácil y rápido de realizar, mientras que los ensayos de fatiga son largos, costosos y laboriosos.

El ensayo Fénix puede ser aplicado de forma sencilla y rápida para ver el cambio de las propiedades de las mezclas con la temperatura. Apreciando cuándo la mezcla pasa de una respuesta dúctil a un comportamiento frágil.

También permite valorar el efecto que tiene la granulometría y, sobre todo, el tipo de ligante para mejorar la cohesión, ductilidad y resistencia a la fisuración de las mezclas, caso de los betunes modificados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- I. Pérez Jiménez, F.; Miró Recasens, R. Evaluación de la cohesión y susceptibilidad térmica de los ligantes bituminosos mediante el método funcional UCL. Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto
- II. Sevilla, España, 1-6 de Noviembre de 1999.
- III. Pérez Jiménez, F.; Miró Recasens, R.; Martínez, A. Evaluación de la adhesividad árido-ligante mediante el método funcional UCL. Efecto del tipo y naturaleza del filler. 10º Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto. Sevilla, España, 1-6 de Noviembre de 1999.
- IV. Miró Recasens, R.; Pérez Jiménez, F. Evaluación de la resistencia al envejecimiento de los ligantes bituminosos mediante el método funcional UCL. 10º Congreso

- Ibero-Latinoamericano del Asfalto. ISBN: 84-89875-08-1, Obra completa; 84-89875-09-X, Volumen I. Sevilla, España, 1-6 de Noviembre de 1999.
- V. Miró Recasens, R.; Pérez Jiménez, F.; Fonseca, C. Aplicación del ensayo BTD de tracción directa al estudio y dosificación de microaglomerados. 10º Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto. ISBN: 84-89875-08-1, Obra completa; 84-89875-09-X, Volumen I. Sevilla, España, 1-6 de Noviembre de 1999.
- VI. Pérez Jiménez, F.; Cepeda Aldape, J.; Miró Recasens, R. Aplicación del ensayo BTD para determinar la energía de fractura y el comportamiento a fatiga de las mezclas bituminosas. 11º Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto. Lima, Perú, 11-16 de Noviembre de 2001.
- VII. Daguerre, L.; Miró Recasens, R.; Pérez Jiménez, F.; Bianchetto, H.; Nossetti, A.; Martínez, C. Análisis mediante el método BTD y UCL del efecto del tipo y porcentaje de filler en el comportamiento del mástico asfáltico. 11º Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto. Lima, Perú, 11-16 de Noviembre de 2001.
- VIII. Bianchetto, H.; Miró Recasens, R.; Pérez Jiménez, F.; Daguerre, L.; Nossetti, A. Aplicación del método UCL a la caracterización de asfaltos. Experiencias en España y Argentina. 11º Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto. Lima, Perú, 11-16 de Noviembre de 2001.
- IX. Miró Recasens, R.; Pérez Jiménez, F.; Pasqualin, A. Comportamiento a fatiga de mezclas bituminosas recicladas en caliente. 12º Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto. Quito, Ecuador, 9-14 de Noviembre de 2003.
- X. Pérez Jiménez, F.; Miró Recasens, R.; Martínez, A. Caracterización de los ligantes bituminosos a partir de su tenacidad y energía de rotura. XIII Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto. San José, Costa Rica, 20-25 de Noviembre de 2005.
- XI. Bianchetto, H.; Miró Recasens, R.; Pérez Jiménez, F. Resistencia al envejecimiento de las mezclas bituminosas en caliente: beneficios y limitaciones de la incorporación de filleres comerciales. Primera parte: estudios en base al método UCL. XIII Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto. San José, Costa Rica, 20-25 de Noviembre de 2005.
- XII. Pérez Jiménez, F.; Miró Recasens, R.; Martínez, A. Relación entre la respuesta mecánica de las mezclas bituminosas a tracción directa y su comportamiento a fatiga. XIV Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto. La Habana, Cuba, 18-23 de Noviembre de 2007.
- XIII. Wagoner, M.; Buttlar, W.; Paulino, G. Disk-shaped Compact Tension test for asphalt concrete fracture, *Experimental Mechanics*, Vol. 45, N° 3, pp 270-277, 2005.
- XIV. Pérez-Jiménez, F., Botella, R., Moon, K.H., Marasteanu, M. O. Application of SCB and Fénix tests for assessing the effect of load application time and temperature on the fracture energy of asphalt mixtures. Transportation Research Board 92nd Annual Meeting, 2013. Washington DC.
- XV. Valdés, G.; Pérez Jiménez, F.; Miró Recasens, R.; Martínez, A.; Amorós, J. Desarrollo de un nuevo ensayo experimental para la evaluación de la resistencia a tracción directa y la energía disipada en el proceso de fractura de las mezclas bituminosas. XV Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto. Lisboa, Portugal, 22-27 de Noviembre de 2009.
- XVI. Valdés, G.; Miró Recasens, R.; Martínez, A.; Amorós, J.; Buisson, J. El Proyecto FENIX en la UPC. Mezclas asfálticas recicladas fabricadas con altas tasas de material bituminoso reciclable (RAP). XV Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto. Lisboa, Portugal, 22-27 de Noviembre de 2009.
- XVII. Pérez Jiménez, F.; Miró Recasens, R.; Martínez, A.; Botella, R.; Valdés, G. Evaluación del comportamiento a fatiga de las mezclas bituminosas mediante ensayos de fractura (FENIX) y cíclicos de barrido de deformaciones (EBADE). XVI Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto. Rio de Janeiro (Brasil), 20-25 de Noviembre de 2011. 



Estudio de la difusión de rejuvenecedor en betún por espectroscopia de infrarrojos



Verónica CONTRERAS IBÁÑEZ
Octavio LUCIO ESPERILLA
Antonio PÉREZ LEPE
Luis Carlos QUINTERO TOSCANO

*Dirección de Tecnología de Repsol
Dirección de Tecnología de Repsol
Dirección de Tecnología de Repsol
Dirección de Tecnología de Repsol*

RESUMEN

Además del impacto e interés ecológico y social, el reciclado de firmes es una operación de gran interés económico, y técnico. En los últimos años, debido al aumento tanto de la concienciación medioambiental como a la necesidad de optimizar los procesos productivos, se han diseñado distintos tipos de ligantes con rejuvenecedores con el fin de perfeccionar el reciclado de materiales envejecidos de los firmes devolviéndoles sus características originales perdidas. En este trabajo se aborda el cálculo del coeficiente de difusión entre el rejuvenecedor y el betún mediante un método basado en la espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier con reflexión total atenuada (FTIR-ATR). El conocimiento de estos coeficientes permiten evaluar, y en su caso, predecir el comportamiento de los rejuvenecedores en el betún.

Palabras clave: Firmes, Reciclado, Medioambiente, Ligantes, Betún

INTRODUCCIÓN

Desde hace algunos años el reciclado y reutilización de materiales es uno de los aspectos que más interés despierta en ámbitos científicos debido a la creciente sensibilización social sobre la preservación del medio ambiente. Esta circunstancia ha hecho que cada vez sea más necesario el reciclado de los materiales envejecidos, entre ellos está el firme de carreteras que tiene un uso extensivo dentro de nuestra sociedad actual. Conscientes de la importancia económica, social y ambiental, Repsol ha desarrollado una gama de betunes con rejuvenecedores para optimizar la técnica de regeneración de capas de firme envejecidas.

El proceso por el cual se restaura la composición óptima del betún envejecido con betún con rejuvenecedor está influenciado fundamentalmente por los siguientes factores:

- Mezcla mecánica,
- Difusión y,
- Compatibilidad entre los distintos compuestos químicos del betún envejecido y del betún con rejuvenecedor.

La difusión puede ser definida como el mecanismo por el cual la materia es transportada por la materia. Los átomos de gases, líquidos y sólidos están en constante movimiento y se desplazan en el espacio tras un período de tiempo. En los gases, el movimiento de los átomos es relativamente veloz, tal efecto se puede apreciar por el rápido avance de los olores desprendidos al cocinar o el de las partículas de humo. En los líquidos, los átomos poseen un movimiento más lento, esto se pone en evidencia en el movimiento de las tintas que se disuelven en agua líquida. El transporte de masa en líquidos y sólidos se origina generalmente debido a una combinación de convección (movilización de fluido) y difusión. En los sólidos, estos movimientos atómicos quedan restringidos (no existe convección), debido a los enlaces que mantienen los átomos en las posiciones de equilibrio, por lo cual el único mecanismo de transporte de masa es la difusión. Sin embargo las vibraciones térmicas que tienen lugar en sólidos permiten que algunos átomos se muevan.

Desde el punto de vista macroscópico la difusión es un proceso que es función del tiempo, es decir la cantidad de elemento transportado dentro de otro depende de este parámetro, por lo que muchas veces es necesario conocer a qué velocidad se produce la transferencia de masa. Normalmente ésta velocidad se expresa como flujo de difusión, definido como la masa o nº de átomos

que difunden perpendicularmente a través de la unidad de área de un sólido por unidad de tiempo.

Para que exista estado estacionario es necesario que el flujo de difusión (J) no cambie con el tiempo. Donde las concentraciones o presiones de las sustancias que difunden se mantienen constantes. Al representar la concentración C frente a la posición dentro del sólido (x), la gráfica resultante se denomina perfil de concentraciones, siendo la pendiente de ésta gráfica el gradiente de concentraciones. Luego la expresión matemática de la difusión en estado estacionario en una dirección es relativamente sencilla, ya que el flujo es proporcional al gradiente de concentración:

$$J = -D \cdot \frac{dC}{dx}$$

siendo la constante de proporcionalidad D lo que se denomina coeficiente de difusión y se expresa en m²/s. Esta ecuación es conocida como primera ley de Fick.

La mayoría de las situaciones prácticas de difusión son en estado no estacionario. En una zona determinada del sólido, el flujo de difusión y el gradiente varían con el tiempo, generando acumulación o agotamiento de las sustancias que difunden. En estas condiciones se utiliza la ecuación de derivadas parciales que se denomina segunda ley de Fick:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial (D \cdot \frac{\partial c}{\partial x})}{\partial x}$$

El conocimiento y control de procesos y mecanismos de difusión entre betún y rejuvenecedor permitirá el desarrollo de nuevos modelos y ecuaciones que mejoran y optimizan las técnicas de reciclado con betún con rejuvenecedores tanto en su faceta preventiva como reparadora.

En este trabajo se ha empleado la espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier con reflexión total atenuada (FTIR-ATR) para el cálculo del coeficiente de difusión entre el rejuvenecedor y el betún, en función de la temperatura y tiempo de contacto.

La técnica de espectroscopia de infrarrojo permite la identificación de los grupos funcionales de una sustancia. Esto es debido a que cuando una molécula absorbe radiación infrarroja, la vibración intramolecular con frecuencia igual a la de la radiación, aumenta en intensidad, lo que genera señales con frecuencias que

corresponden a la vibración de un enlace específico. La región infrarroja se divide en tres regiones denominadas infrarrojo cercano (NIR), infrarrojo medio (MIR) e infrarrojo lejano (FIR). El espectrómetro de IR con transformada de Fourier permite la obtención de espectros de forma rápida, precisa y con relaciones señal/ruido elevadas.



Figura 1. Detalle del equipo empleado de FTIR-ATR.

El ATR (Reflexión Total Atenuada) es una técnica de medida espectroscópica, la cual se produce cuando una radiación infrarroja entra en un cristal ATR transmisor y de alto índice de refracción. El cristal está diseñado para permitir una reflexión interna total que crea una onda evanescente sobre la superficie del cristal. Esta onda se extiende a la muestra que se mantiene en contacto íntimo con el cristal, registrándose el espectro de infrarrojo del material a analizar. La Espectroscopia de Infrarrojo es una de las técnicas espectroscópicas más versátiles y de mayor aplicación en la caracterización e identificación de materiales, análisis de productos farmacéuticos y de síntesis, análisis de contaminantes, ciencia forense, biomedicina, agricultura y alimentación entre otros.

El objetivo de este estudio ha sido estudiar la difusión de un rejuvenecedor en un betún, para ello se ha partido del experimento realizado por Robert Karlsson y Ulf Isacson "Application of FTIR-ATR to Characterization of Bitumen Rejuvenator Diffusion".

En el experimento de Robert Karlsson y Ulf Isacson se utiliza un accesorio ATR horizontal con cristal de Seleniuro de Zinc (SeZn) de varios rebotes. El betún se coloca sobre el cristal de SeZn con galga de entre 500 a 200µm y sobre el betún se coloca un film de rejuvenecedor del mismo espesor con una nueva galga, manteniéndose



Figura 2. Esquema de la disposición de los materiales.

dose a temperatura constante durante todo el proceso de difusión.

Para cada temperatura se calcula la constante de difusión en una gráfica de concentración (función de absorbancia de distintos picos del espectro IR obtenido frente al tiempo en segundos) considerando un sistema unidimensional que cumple la ley Fick resolviendo la siguiente ecuación en cada punto:

$$c(x,t) = (1-\alpha) \cdot c_0 - \frac{2c_0}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(cm\pi)}{n} \cos\left[\frac{n\pi x}{L}\right] \cdot e^{-\left[\frac{n\pi}{L}\right]^2 Dt}$$

Donde:

- c: concentración en fracción molar;
- c₀: concentración inicial
- α: fracción longitudinal
- L: espesor
- x: posición
- t: tiempo

La temperatura ejerce una gran influencia en las constantes de difusión y por lo tanto en la velocidad a la que tiene lugar la difusión. Considerando que la influencia de la temperatura sigue una ecuación del tipo Arrhenius:

$$D(T) = D_0 e^{-\frac{k}{T}}$$

Si se toma logaritmo en la ecuación anterior :

$$\ln D(T) = \ln D_0 - k \cdot \frac{1}{T}$$

La expresión adquiere la forma de la ecuación de una recta:

$$y = mx + b$$

donde x es el logaritmo de la constante de difusión e y es el inverso de la temperatura en grado Kelvin (K).

TRABAJO REALIZADO

Se han realizado curvas de concentración del rejuvenecedor en el betún frente al tiempo a diferentes temperaturas y se ha estudiado la influencia de la temperatura en la constante de difusión.

Inicialmente se emplearon celdas ATR de SeZn frente a las prisma de diamante (2mm de lado y un solo rebote) de mayor uso en la actualidad. Las celdas de SeZn suelen tener un tamaño más grande, por lo que en los primeros experimentos se obtuvo una difusión imperfecta con valores poco fiables y no repetitivos. Esta circunstancia, hizo que la experimentación se llevara cabo con prisma de diamante finalmente.

De todos los experimentos realizados, se ha constatado no sólo que la temperatura es crucial para el buen término del mismo, sino que también se necesita que tanto el betún como el rejuvenecedor estén desde el principio del experimento a la temperatura del ensayo. Además se ha comprobado que la correcta extensión de película tanto del betún como del rejuvenecedor es decisivo, ya que la medida de la galga se encuentra dentro de la ecuación a resolver.

RESULTADOS

Las curvas obtenidas de concentración, como función de la absorbancia y el espesor de la galga frente al tiempo pueden ser observadas en la siguiente figura.

Se muestran las curvas obtenidas a las distintas temperaturas a las que se ha realizado el ensayo: 30°C, 60°C, 80°C y 100°C.

Se deberían tener medidas constantes y paralelas al eje x, hasta que el rejuvenecedor no comienza a medirse, sin embargo aparecen como una deriva positiva fruto del ajuste de las temperaturas de todo el sistema provocando una tendencia ascendente de ajuste de temperaturas y otra descendente de la llegada del rejuvenecedor a la célula, provocando que el inicio aparente en las curvas quede retrasado con respecto al inicio real.

Se ha calculado la constante de difusión como el cociente entre la superficie del diamante y el tiempo que tarda en recorrerlo completamente. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 1.

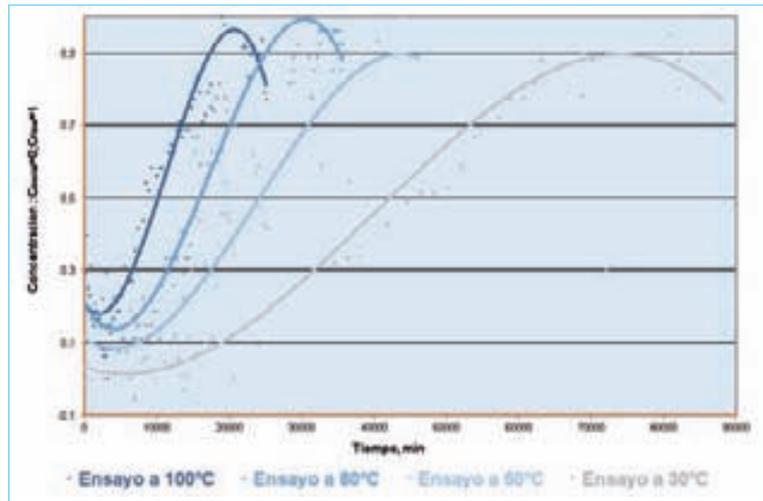


Figura 3. Difusión de Rejuvenecedor en betún por IR-ATR concentración frente a tiempo.

TEMPERATURA, °C	T (K)	1/T (1/K)	D (M2/S)	LN (D)
30	303	0,00330033	7,00E-11	-23,383
60	333	0,003003	1,17E-10	-22,869
80	353	0,00283286	1,59E-10	-22,562
100	373	0,00268097	2,10E-10	-22,284

Tabla 1.

Representando el logaritmo de la constante de la difusión frente al inverso de la temperatura en grado Kelvin (K), se confirma que la constante de difusión está influenciada por la temperatura, siendo mayor cuanto mayor sea la temperatura.

En la página siguiente, se muestra el gráfico obtenido (Gráfico 1), en el que además se encuentra representada la ecuación de la recta resultante.

Por tanto, se confirma que hay buena correlación entre la constante de difusión y la temperatura siendo posible el cálculo a partir de la ecuación de la recta de la línea de tendencia de las constantes de difusión a una temperatura dada.

CONCLUSIONES

- Es posible medir la difusión del rejuvenecedor en el betún a temperatura ambiente. La temperatura ejerce una gran influencia en las constantes de difusión y por lo tanto, en la velocidad a la que tiene lugar la misma. La difusión entre rejuvenecedor y betún es mayor cuanto mayor sea la temperatura.
- Es posible el cálculo del coeficiente de difusión entre el rejuvenecedor y el betún mediante un método

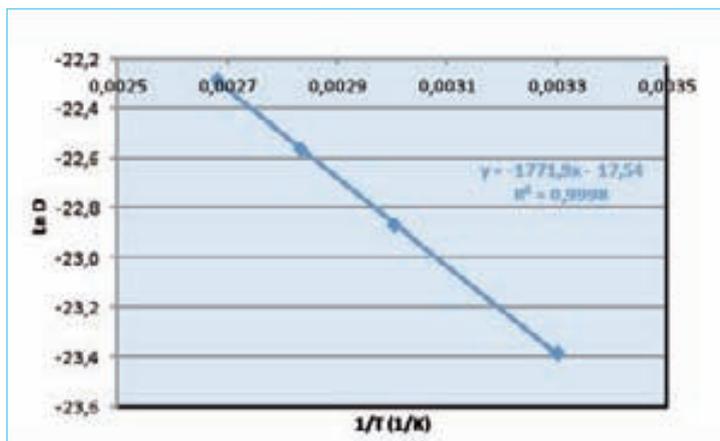


Gráfico 1. Influencia de la temperatura en la constante de difusión.

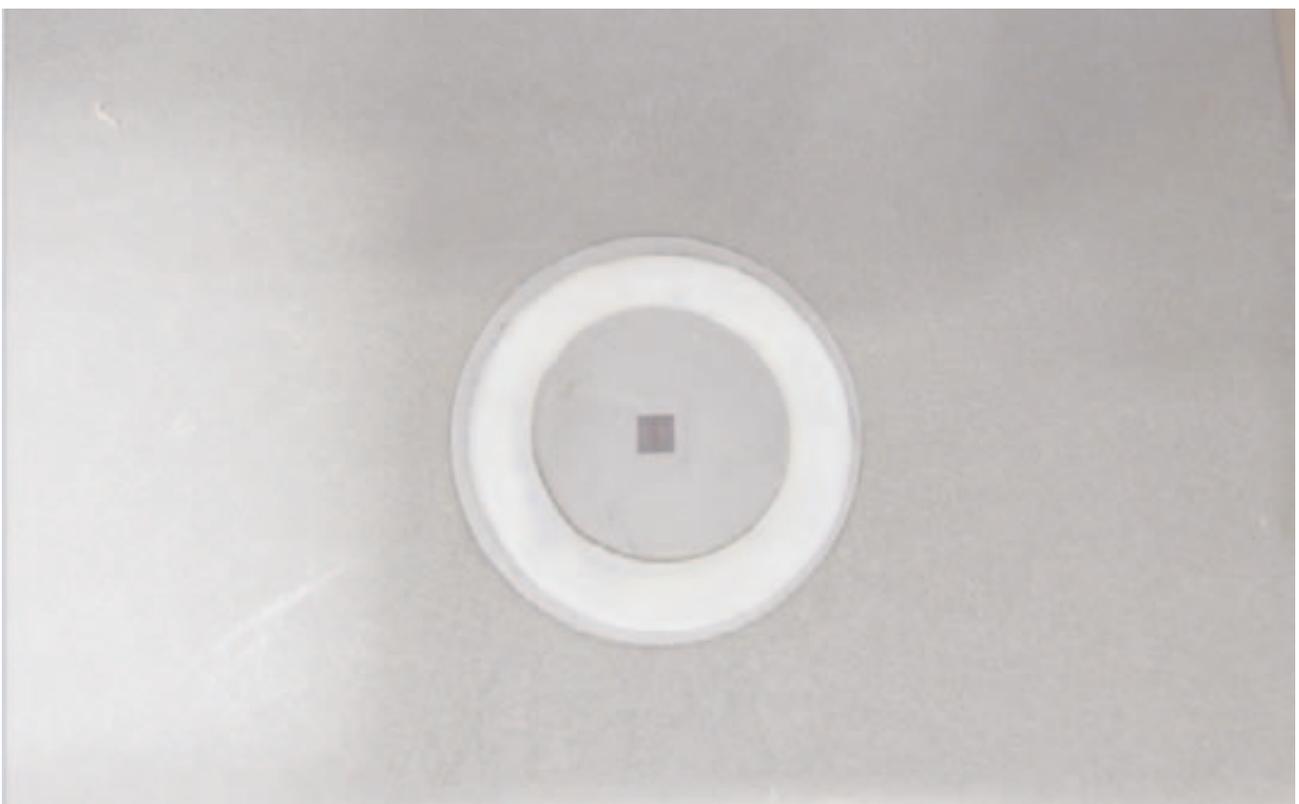
basado en la espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier con reflexión total atenuada (FTIR-ATR).

- Debido a la influencia de la temperatura en la difusión, la experimentación requiere asegurar una temperatura constante durante todo el experimento, además de posibilitar un contacto uniforme y una temperatura inicial idéntica entre rejuvenecedor y betún desde el principio del ensayo.

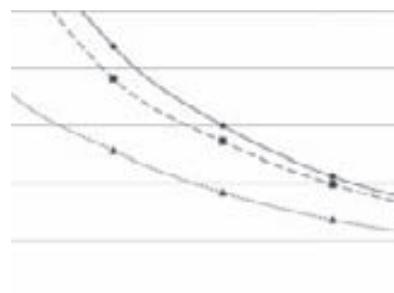
- El conocimiento y control de los procesos y mecanismos de difusión entre betún y rejuvenecedor permitirá el desarrollo de nuevos modelos y ecuaciones que mejoren y optimicen las técnicas de reciclado con betún con rejuvenecedores tanto en su faceta preventiva como reparadora.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- I. Robert Karlsson y Ulf Isacsson "Application of FTIR-ATR to Characterization of Bitumen Rejuvenator Diffusion".
- II. Wu-Jang Huang, Chuan-Chen Lee and Odette Varela Milla "Morphology And Mobility Studies On Municipal Solid Waste Incineration Baghouse Ashes".
- III. Robert Karlsson ,Ulf Isacsson , Jonas Ekblad "Rheological characterisation of bitumen difusión".
- IV. Beatriz Aranda, "Difusión en estado sólido".
- V. Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable UAEM-UNAM. "Espectroscopia de IR/ATR".



Estudio del efecto de ceras reductoras de la viscosidad en un betún modificado con caucho



Ana María RODRÍGUEZ-ALLOZA

Universidad Politécnica de Madrid
Madrid, España

Juan GALLEGO

Universidad Politécnica de Madrid
Madrid, España

Ignacio PÉREZ

Universidade da Coruña
A Coruña, España

RESUMEN

Debido a una creciente preocupación sobre el calentamiento global, la industria de las mezclas bituminosas está haciendo un constante esfuerzo para lograr disminuir sus emisiones mediante la reducción de las temperaturas de fabricación y puesta en obra sin que se vean comprometidas las propiedades mecánicas de las mezclas bituminosas. El uso de mezclas con caucho de neumáticos ha logrado demostrar que estas mezclas pueden ser económicas, ecológicas y que mejoran el comportamiento de los pavimentos. Sin embargo, las mezclas con betunes de alto contenido en caucho presentan un inconveniente: su fabricación exige mayores temperaturas de mezclado y puesta en obra debido a la elevada viscosidad causada por la presencia masiva de caucho, siendo la emisión de gases de efecto invernadero mayor que la de las mezclas bituminosas convencionales. Este trabajo presenta un estudio realizado sobre el efecto de cuatro aditivos reductores de la viscosidad de naturaleza orgánica añadidos a un betún modificado con un 15% de caucho. Los resultados del estudio indican que los aditivos logran disminuir la viscosidad, aumentar la temperatura de reblandecimiento y disminuir la penetración.

Palabras clave: Ceras reductoras, NFU, Viscosidad NFU

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la protección ambiental, el ahorro de energía y el desarrollo sostenible se han convertido en importantes temas globales. En la construcción de carreteras, nuevas tecnologías como las mezclas semicalientes y las mezclas con caucho de neumáticos se han desarrollado activamente para promover el ahorro de energía y la protección del medio ambiente.

El triturado de caucho de neumáticos se ha estado utilizando como un material respetuoso con el medio ambiente que proporciona pavimentos con un buen comportamiento mecánico, disminuye el ruido ocasionado por el tráfico así como los costes de mantenimiento y aumenta la vida del pavimento (Ruth y Roque, 1995; Liang y Lee, 1996; Huang et al, 2002). Sin embargo, la fabricación de mezclas con caucho requiere aumentar las temperaturas de fabricación hasta 180°C (Akisetty et al, 2009, 2010 y 2011) debido a que el caucho confiere gran viscosidad al ligante y por ello el betún es más sensible a la disminución de la temperatura (CEDEX, 2007). Desde el punto de vista técnico, se han propuesto distintas soluciones para conseguir rebajar estas temperaturas. Entre estas soluciones se encuentran las mezclas semicalientes, que permiten reducir las temperaturas de fabricación y puesta en obra al reducir la viscosidad de los betunes usando aditivos orgánicos, aditivos químicos o procesos de espumación (Hurley y Prowell, 2005; D'Angelo et al).

Si la tecnología de las mezclas semicalientes se aplica a de los betunes con caucho, se podrían producir mezclas con buenas propiedades y un menor coste e impacto ambiental. Aunque hay numerosos estudios de betunes de mezclas semicalientes, apenas se han realizado estudios de betunes y mezclas semicalientes con caucho de neumáticos (Akisetty et al, 2009; Wang et al 2012).

En este trabajo se presentan los resultados de los ensayos de viscosidad dinámica, punto de reblandecimiento, penetración de betunes con un 15% de caucho y los correspondientes ligantes de control. Los porcentajes de aditivos añadidos han sido 0%, 2% y 4%.

MATERIALES

El betún usado en este estudio ha sido un B 50/70, betún asfáltico que permite la fabricación y puesta en obra de las mezclas asfálticas a las temperaturas habituales. A este betún se le añade un 15% en peso de caucho para obtener un betún de alta viscosidad modificado con caucho. Se ha usado un único lote de polvo de caucho procedente de la trituración mecánica de neumáticos fuera de uso.

Los aditivos seleccionados para este trabajo han sido de tipo orgánico, ceras que se usan para modificar la viscosidad del betún y, por lo tanto, reducir la temperatura de fabricación y compactación de las mezclas bituminosas. El primer tipo de cera, A1, es una cera Fisher Tropisch o cera sintética que se crea durante el proceso de gasificación de carbón; la segunda, A2, es una cera Montana obtenida por extracción con disolvente de ciertos tipos de lignito; la tercera, A3, es también una cera Montana mezclada con una amida de ácido graso y la cuarta y última, A4, es puramente una amida de ácido graso.

RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN

1. Viscosidad

Cada betún se ensayó usando un viscosímetro rotacional Brookfield. La viscosidad se midió en el rango de temperaturas más amplio posible de modo que se

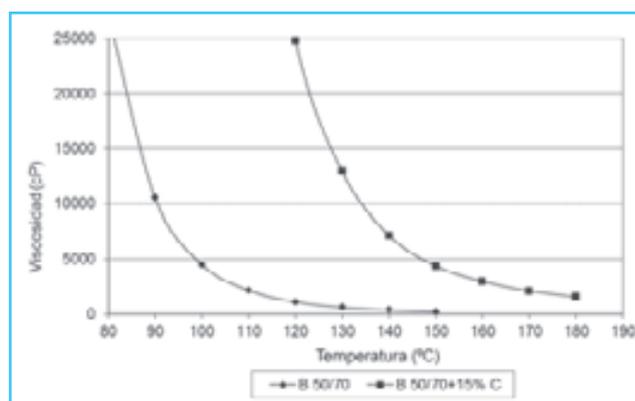


Figura 1. Influencia del caucho en el betún B 50/70.

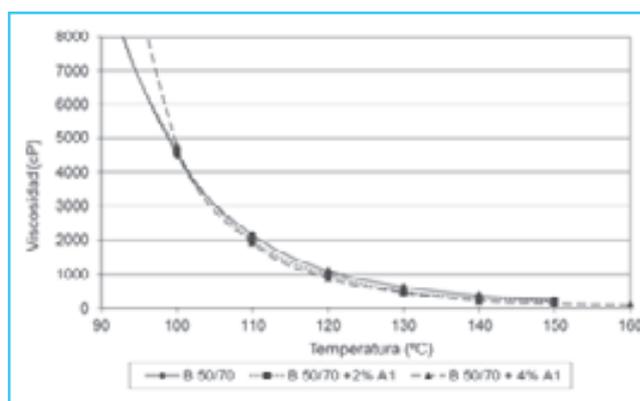


Figura 2. Influencia del aditivo A1 en la viscosidad del betún B 50/70.

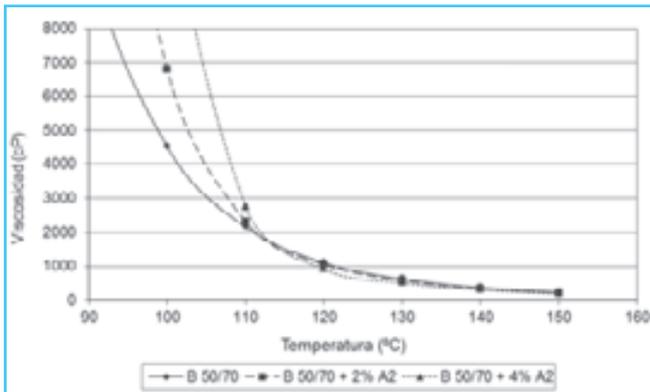


Figura 3. Influencia del aditivo A2 en la viscosidad del betún B 50/70.

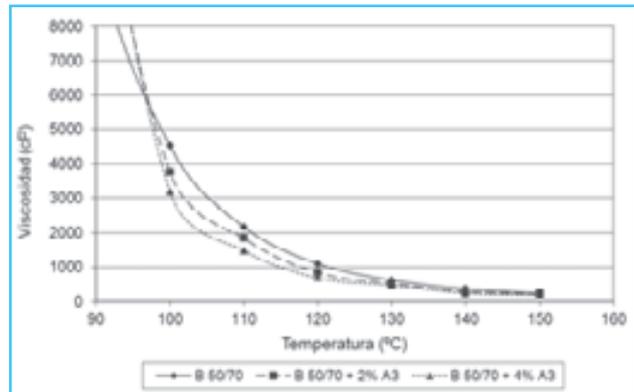


Figura 4. Influencia del aditivo A3 en la viscosidad del betún B 50/70.

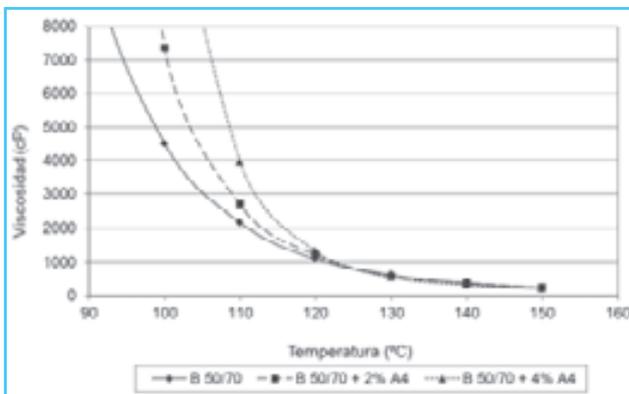


Figura 5. Influencia del aditivo A4 en la viscosidad del betún B 50/70.

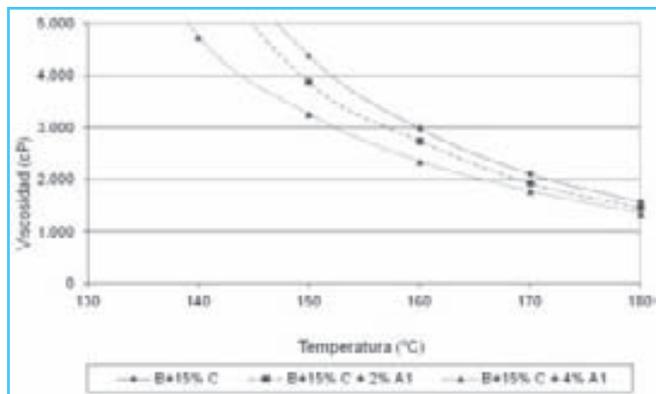


Figura 6. Influencia de A1 en la viscosidad del betún B 50/70 modificado con un 15% de caucho.

podría observar con mayor claridad el fenómeno de la disminución de la viscosidad debido a la incorporación del aditivo. La Norma usada en este ensayo fue la UNE-EN 13302:2010 (Betunes y ligantes bituminosos. Determinación de la viscosidad dinámica de los ligantes bituminosos usando un viscosímetro de rotación de aguja). Los resultados obtenidos se resumen en las Figuras 1-9. En las figuras B+15%C se referirá al betún B 50/70 al que se le ha añadido un 15% de polvo de caucho en peso.

Tal y como se puede observar en la Figura 1, la adición de 15% de polvo de neumático en un betún B 50/70 aumenta la viscosidad del asfalto en gran medida y, consecuentemente, aumentarán las temperaturas de fabricación y de compactación, siendo este el principal inconveniente de los betunes modificados con caucho. En la Figura 2 se presenta la influencia del aditivo A1 en la viscosidad dinámica en un betún sin caucho. Las ceras Fisher Tropsch tienen puntos de fusión entre 85°C y 115°C (D'Angelo et al, 2008). Se puede observar que a partir de los 100 °C se produce un cambio ya que, al fundirse la cera, las viscosidades disminuyen, quedando la curva de 4% de la cera A1 por debajo de la del 2%. La adición de cera A2 (Figura 3) también hace disminuir la viscosidad. Se puede observar que el cambio

se produce entre los 110-115° C tal y como se preveía (Drüschner, 2009; Damm et al, 2002) y que la curva del 4% queda levemente por debajo de la del 2%. Con la cera A3 (Figura 4) el cambio de viscosidades se produce entre los 90 y los 100°C, puesto que este tipo de cera tiene un punto de fusión más bajo que las ceras Fisher Tropsch (D'Angelo et al, 2008). En este caso también se puede observar que la curva del 4% queda por debajo de la del 2%. En cuanto al efecto de la cera A4 (Figura 5) es el mismo que el descrito anteriormente salvo que el descenso de viscosidad ocurre a una temperatura más alta, por encima de los 120°C, ya que este tipo de cera tiene un punto de fusión más alto (Hirsch, 2007; Wölfe y Orklamünder, 2007).

Las Figuras 6-9 muestran la influencia de las ceras en betunes con un 15% de caucho. Se puede observar que con todas ellas, la viscosidad en betunes con 15% de caucho disminuye, más cuanto mayor es el contenido de aditivo, lo cual indica que cada uno de ellos tiene el potencial de reducir la temperatura de mezcla y compactación de las mezclas bituminosas con caucho.

La viscosidad del betún con caucho que contiene la cera A1 (Figura 6) disminuye en proporción a la cantidad de aditivo. En el caso de la ceras A2 y A3 (Figuras 7 y 8), la

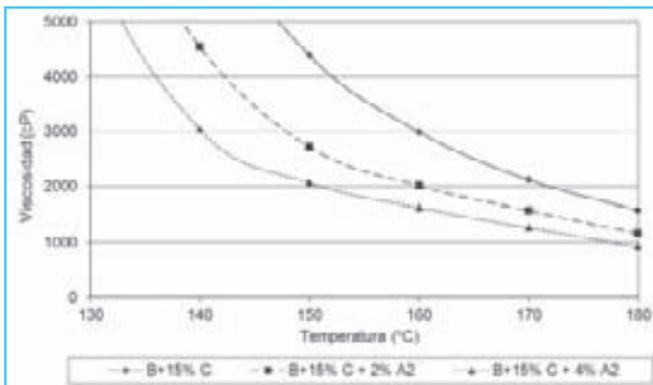


Figura 7. Influencia de A2 en la viscosidad del betún B 50/70 modificado con un 15% de caucho.

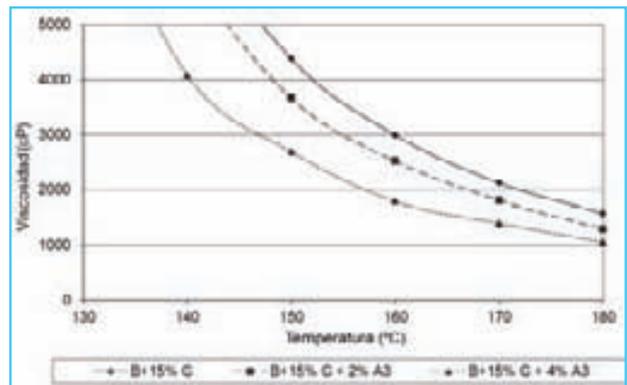


Figura 8. Influencia de A3 en la viscosidad del betún B 50/70 modificado con un 15% de caucho.

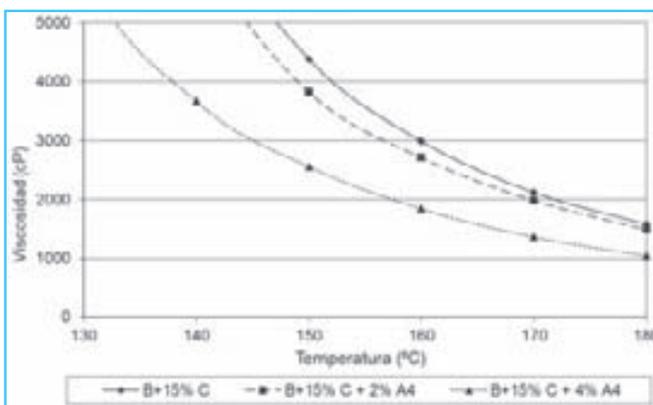


Figura 9. Influencia de A4 en la viscosidad del betún B 50/70 modificado con un 15% de caucho.

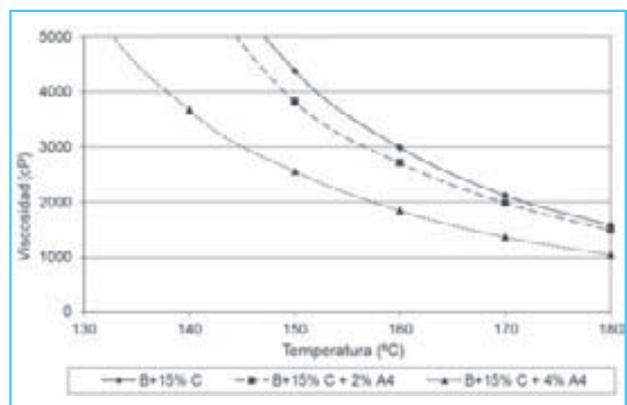


Figura 10. Descenso de la temperatura de fabricación en el betún B 50/70.

viscosidad decrece considerablemente, especialmente cuando se ha añadido un 4%. La cera A4 (Figura 9) también disminuye notablemente la viscosidad cuando se ha añadido un 4% al betún, sin embargo, la adición de un 2% produce un efecto menos pronunciado.

Al añadir los aditivos a un betún B 50/70 y a un betún B 50/70 con un 15% de caucho se produce una bajada de la viscosidad que se traducirá en una bajada de las temperaturas de fabricación de las mezclas bituminosas. Para estimar teóricamente cuánta temperatura permiten hacer descender estos aditivos se han hecho unos cálculos tomado como referencia que la mezcla idónea del B 50/70 con los áridos para fabricar las mezclas bituminosas se produce cuando la viscosidad del betún es próxima a los 180 cP (mPa.s); valor que se alcanza a una temperatura de unos 170°C y que para un betún B 50/70 con un 15% de caucho será próxima a los 1.500 cP (mPa.s); valor que se alcanza a una temperatura de unos 180°C. El resumen de estos cálculos se encuentra en las Figuras 10 y 11. En ambos casos se puede observar como el 4% de cada cera logra hacer descender la temperatura de fabricación de las mezclas bituminosas más que si se añadiera solamente un 2% de cera.

En el caso de un betún sin caucho la cera que más logra disminuir la temperatura de fabrica-

ción es el 4% de la cera A1, logrando disminuirla unos 25°C, seguido por el 4% de la cera A2. Para betunes B 50/70 con un 15% de caucho el aditivo que más logra reducir la temperatura de fabricación es el 4% de la cera A2, llegando a reducirla unos 18°C, seguido por el 4% de la cera A4 y el 4% de la cera A3.

2. Punto de reblandecimiento y penetración

Los resultados del ensayo de anillo y bola se muestran resumidos en las Figuras 12 y 13. Se puede observar que las temperaturas de reblandecimiento aumentan debido, por un lado, a la presencia de caucho y por otro, a la incorporación de los aditivos orgánicos. Luego tanto el caucho como cualquiera de los aditivos estu-

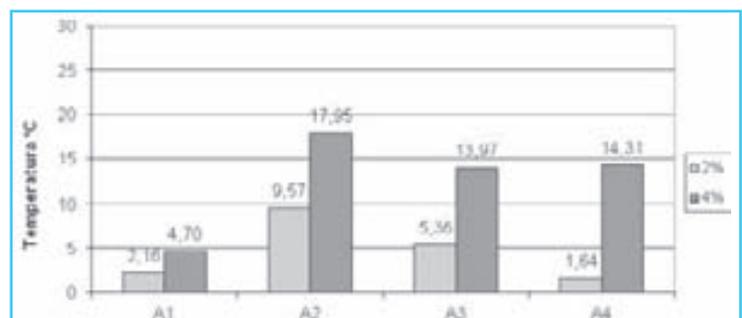


Figura 11. Descenso de la temperatura de fabricación en el betún B 50/70 modificado con un 15% de caucho.

diados actuarán como estabilizantes mejorando la resistencia a deformaciones plásticas de las mezclas bituminosas. Este aumento de la temperatura de reblandecimiento está de acuerdo con el hecho de que las ceras utilizadas tienen temperaturas de fusión superiores a 90 °C por lo que a temperaturas inferiores no sólo no fluidifican el ligante sino que incluso le dan más consistencia. La cera que logra un mayor punto de reblandecimiento la A4 seguida por la A2, el A3y la A1.

El ensayo de penetración define la consistencia del betún a 25°C de temperatura a partir de un ensayo de indentación. Los resultados son los mostrados en las Figuras 14 y 15. Se puede observar que la incorporación de caucho, reduce la penetración, ya que el caucho hace que el ligante sea más consistente. Por otro lado, la incorporación de aditivo también disminuye la penetración. Esto es debido a que los aditivos reductores de la viscosidad no se fluidifican hasta su fusión, que se produce a temperaturas mayores de 90°C. El ensayo de penetración se realiza a 25°C, temperatura en la que los aditivos aumentan la consistencia del ligante. Además, al comparar los diferentes aditivos entre sí, el betún más consistente es siempre el que contiene como aditivo la cera A1 y el más blando el que contiene la cera A2.

CONCLUSIONES

En este estudio se ha observado que la incorporación de los cuatro aditivos orgánicos estudiados hace posible disminuir la viscosidad del ligante modificado con un 15% de caucho. El aditivo que consigue una mayor disminución de la temperatura de fabricación es el 4% de A2 (cera Montana), seguido por la cera A3 (cera Montana con mezclada con una amida de ácido graso y la cera A4 (amida de ácido graso). Sin embargo, en el betún sin caucho, la cera más eficaz es la A1 (cera Fisher Tropsch). También se ha observado que, en términos generales, la reducción teórica de temperatura de fabricación de mezclas bituminosas es menor en los betunes con un 15% de caucho que en los betunes puros y que el 4% de cualquiera de los aditivos logra disminuir la viscosidad más que si se añadiera solamente un 2% de aditivo.

Asimismo, la incorporación de estos aditivos en el betún modificado con un 15% de caucho hace que la penetración disminuya, que la temperatura de reblandecimiento

aumente, lo cual concuerda con el hecho de que las temperaturas de fusión de estas ceras está por encima de la temperatura a la que se desarrollan estos ensayos de penetración y punto de reblandecimiento. El aditivo que más aumenta la temperatura de reblandecimiento es el 4% de la cera A4 seguido por el 4% de la cera A2. Y el aditivo que más ha reducido la penetración ha sido 4% de de la cera A1.

Se ha observado que a mayor contenido de aditivo, mayor es la temperatura de reblandecimiento y menor es el resultado del ensayo de penetración. Este hecho es muy importante, porque tanto la penetración como la temperatura de reblandecimiento forman parte de las propiedades que se exigen en las especificaciones técnicas de ligantes y, por tanto, para diseñar un betún con

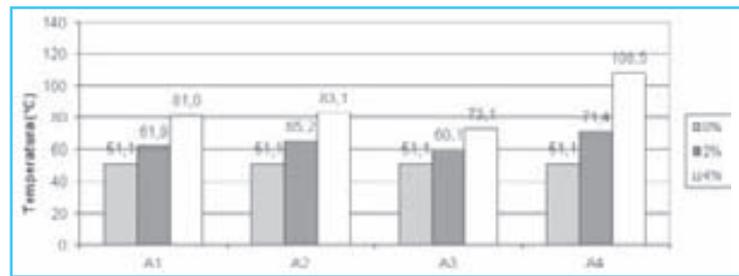


Figura 12. Influencia de las ceras en el punto de reblandecimiento del betún B 50/70

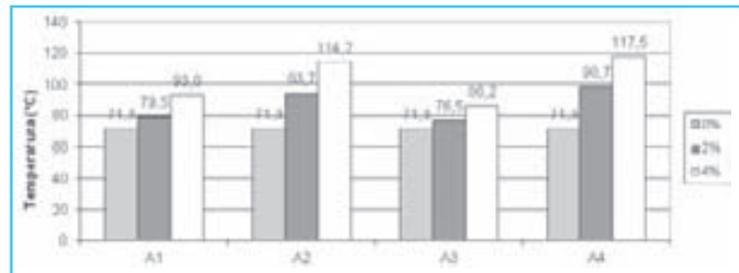


Figura 13. Influencia de las ceras en el punto de reblandecimiento del betún B 50/70 modificado con un 15% de caucho.

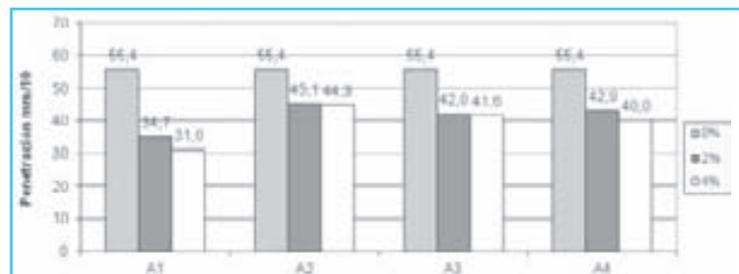


Figura 14. Influencia de las ceras en la penetración del betún B 50/70.

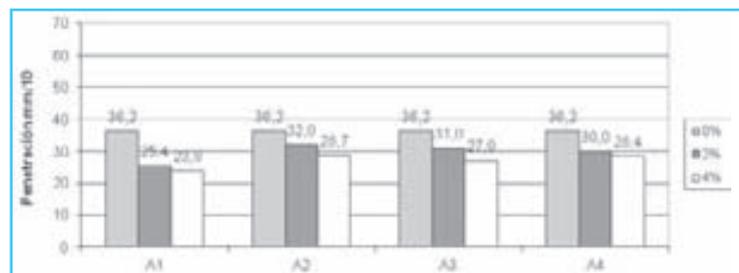
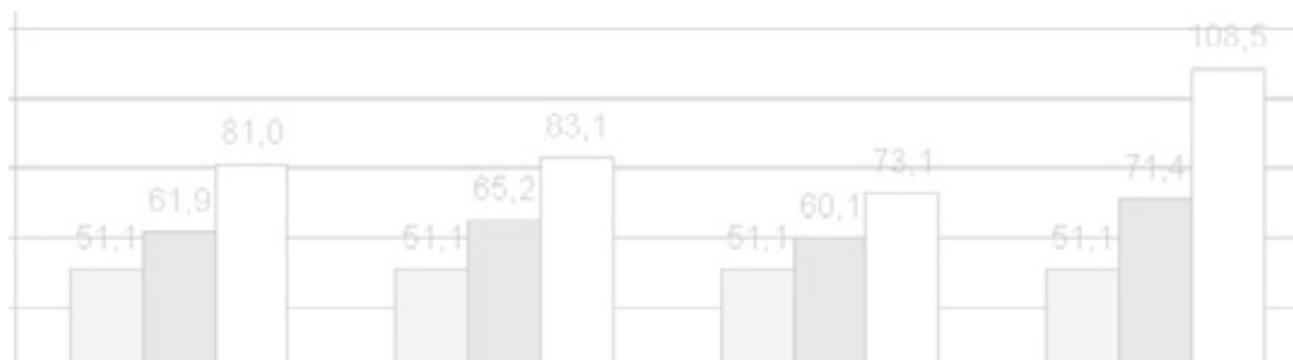


Figura 15. Influencia de las ceras en la penetración del betún B 50/70 modificado con un 15% de caucho.

caucho para mezclas semicalientes, no sólo ha de considerarse la reducción de viscosidad que logra el aditivo, sino los importantes cambios que ocasionan en otras propiedades. En definitiva, han de considerarse conjuntamente el contenido de caucho y de aditivo de modo que el producto resultante encaje en las especificaciones y no se vean comprometidas otras propiedades del ligante como podría ser una excesiva rigidez de la mezcla bituminosa por la escasa penetración del ligante.

REFERENCIAS

- I. Akisetty CK., Lee S, Amirkhanian SN. High temperature properties of rubberized binders containing warm asphalt additives. *Constr. Build. Mater.* 2009; vol. 23, pp. 565-573, 1.
- II. Akisetty CK, Gandhi T, Lee S-, Amirkhanian SN. Analysis of rheological properties of rubberized binders containing warm asphalt additives. *Canadian Journal of Civil Engineering* 2010;37(5):763-71.
- III. Akisetty C, Xiao F, Gandhi T, Amirkhanian S. Estimating correlations between rheological and engineering properties of rubberized asphalt concrete mixtures containing warm mix asphalt additive. *Constr Build Mater* 2011;25(2):950-6.
- IV. CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas). Manual de Empleo de Caucho de NFU en Mezclas Bituminosas. Ministerio de Fomento, Ministerio de Medio Ambiente; 2007.
- V. D'Angelo J et al. Warm-Mix Asphalt: European Practice. Report No. FHWA-PL-08-007. American Trade Initiatives, Alexandria, USA; 2008.
- VI. Damm K, Abraham J, Butz T, Hildebrand G and Riebeschl G. Asphalt Flow Improvers as 'Intelligent Fillers' for Hot Asphalts—A New Chapter in Asphalt Technology. *Journal of Applied Asphalt Binder Technology* 2002; pp. Pp 36-69.
- VII. Drüschner L. Experience with Warm Mix Asphalt in Germany. Sønderborg : NVF-rapporter. Guest report in conference; 2009.
- VIII. Hirsch V. Warm Mix Asphalt Technologies. BAST, Germany, Presentation to WM A Scan Team; 2007.
- IX. Huang B, Mohammad LN, Graves PS, Abadie C. Louisiana experience with crumb rubber-modified hot-mix asphalt pavement. *Transport Res Rec: J Transport Res Board* 2002; vol. 1789:1-13.
- X. Hurley G, Prowell B. Evaluation of Sasobit® for Use in Warm Mix Asphalt. NCAT Report; 2005.
- XI. Liang RY, Lee S. Short-term and long-term aging behavior of rubber modified asphalt paving mixtures. *Transport Res Rec: J Transport Res Board* 1996; vol. 1530:11-7.
- XII. Nölting M. 10 Years of Sasobit Technology Experiences, Applications and Outlook. BAST, Germany, Presentation to WM A Scan Team; 2007.
- XIII. Ruth BE, Roque R. Crumb rubber modifier (CRM) in asphalt pavements. *Proceedings of the Transportation Congress*, 1995; p. 768-85.
- XIV. Wang H, Dang Z, You Z and Cao D. Effect of warm mixture asphalt (WMA) additives on high failure temperature properties for crumb rubber modified (CRM) binders. *Constr. Build. Mater.* 2012; vol. 35, pp. 281-288, 10.
- XV. Wölfe H and Orlamünder K. Bitumen Modification with Additives for Road Construction—Technology of Low-Temperature Asphalt. BAST, Germany, Presentation to WM A Scan Team; 2007. 



Reología de los betunes con caucho



Vicente PÉREZ MENA

M^a del Mar COLÁS VICTORIA

Director Técnico Productos Asfálticos, S.A.
Carretera Daganzo, km. 5,5. 28806 Alcalá de Henares, Madrid
Responsable de Desarrollo y Gestión de Producto
Productos Asfálticos, S.A.
Carretera Daganzo, km. 5,5. 28806 Alcalá de Henares, Madrid

RESUMEN

La integración de los neumáticos fuera de uso (NFU) en las mezclas asfálticas se ha revelado como una opción interesante que aporta sinergias técnico-ecológicas, ya que permite modificar el ligante para obtener mezclas asfálticas de mayor calidad y, al mismo tiempo, contribuye a solucionar el problema medioambiental originado por este residuo.

Este artículo ofrece una información adicional en lo que se refiere a las características de estos ligantes, completando las ya conocidas características empíricas con ensayos reológicos, que van a permitir conocer algo más sobre sus propiedades y su comportamiento en las mezclas asfálticas.

Se presentan los resultados obtenidos para diferentes tipos de betunes mejorados con caucho (BC), incluyendo un nuevo betún mejorado para mezclas de alto módulo, y betunes modificados con caucho (BMC), y establece una comparación de sus propiedades con las de los ligantes bituminosos que actualmente se utilizan de forma prioritaria en nuestras carreteras (betunes asfálticos y betunes modificados con polímeros).

Se ofrece, a través de la reología, una herramienta más que permite argumentar el beneficio que supone el empleo de los betunes mejorados y modificados con caucho en la fabricación de mezclas asfálticas

Palabras clave: Betunes caucho, Ensayo reológico, Módulo complejo, Ángulo de fase

INTRODUCCIÓN

El empleo de caucho procedente de neumáticos fuera de uso (NFU) en la construcción de nuestras carreteras ha experimentado un auge en los últimos años y tiende a convertirse en una importante alternativa de reciclado para este residuo, por el elevado volumen de neumáticos que permite procesar. Además, la incorporación de caucho NFU a ligantes, modifica sus propiedades reológicas y mecánicas, y permite aprovechar las características de un material valioso en este aspecto, como lo es el caucho, para mejorar algunas de esas propiedades.

El polvo de caucho para su aplicación en mezclas bituminosas se obtiene generalmente por trituración de los neumáticos fuera de uso (NFU), eliminación de las fibras textiles y metales y posterior molienda, preferentemente mecánica (tamaños inferiores a 1 mm).

Este polvo puede incorporarse a las mezclas bituminosas por los procedimientos denominados vía húmeda y vía seca. El primero consiste en incorporar dicho polvo a un betún asfáltico para obtener un betún con caucho, que se puede utilizar posteriormente en la fabricación de mezclas bituminosas. Las propiedades del ligante obtenido dependen de la naturaleza y composición del betún y del polvo de caucho, así como de las proporciones relativas de ambos componentes, del tamaño de las partículas de caucho y del tiempo y temperatura de mezclado. Los mejores resultados de compatibilidad se obtienen cuanto más fino sea y mayor superficie específica tengan las partículas de caucho, así como mayor porcentaje de caucho natural tenga en su composición

Los betunes con polvo de caucho se pueden fabricar en plantas fijas, donde deben emplearse los medios y formulaciones adecuadas para conseguir ligantes estables, que se puedan transportar a obra y almacenar sin riesgos de separación de fases.

También se pueden fabricar in situ mediante una instalación móvil, que se sitúa en la misma central de fabricación de mezclas bituminosas. De este modo, el ligante se utiliza inmediatamente después de su fabricación sin dar tiempo a que se segregue. Estas instalaciones especiales de fabricación in situ se utilizan preferentemente para fabricar betunes con contenidos muy elevados de caucho que presentan viscosidades muy elevadas.

A nivel de laboratorio, el estudio de las características de los ligantes que incorporan caucho NFU no requiere, en general, la introducción de técnicas especiales, teniendo numerosos puntos en común con los trabajos llevados a cabo para desarrollar los betunes modifica-

dos con polímeros usados habitualmente en la pavimentación de carreteras, siempre que se requieren mayores prestaciones que las que ofrecen los ligantes convencionales.

Por ello, el estudio de los betunes modificados y mejorados con caucho se ha abordado de forma muy similar a como se hizo anteriormente para los ligantes modificados con polímeros, tanto en lo que respecta a la fabricación de los ligantes, como al análisis de sus propiedades.

La publicación, en junio de 2007, del Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas, realizado por el CEDEX por encargo del Ministerio de Medio Ambiente, y la publicación de la Orden Circular 21/2007 sobre el uso y especificaciones que deben cumplir los ligantes y mezclas bituminosas que incorporen caucho de neumáticos fuera de uso, ha permitido disponer de dos documentos de gran importancia para el desarrollo de estas técnicas que ponen las bases para su aplicación.

El manual establece recomendaciones sobre el empleo de polvo de caucho procedente de neumáticos fuera de uso en la fabricación de mezclas bituminosas en caliente para carreteras, indicando aquellos campos de aplicación que están ya avalados por la experiencia en España y las mejoras que se pueden esperar del empleo del polvo de caucho. Se señalan además los criterios para la selección y uso del polvo de caucho y para la dosificación, fabricación, puesta en obra y control de calidad de las unidades de obra correspondientes.

La Orden Circular define y especifica las características de tres tipos de ligantes fabricados con caucho para su utilización mediante la vía húmeda, denominados betún modificado con caucho (BMC), betún mejorado con caucho (BC) y betún modificado de alta viscosidad con caucho (BMAVC). Ello supone establecer tres niveles de incorporación de polvo de caucho y recoger prácticamente toda la gama de posibilidades de obtención de betunes con polvo de caucho que se utilizan en la fabricación de mezclas bituminosas, tanto fabricados en instalaciones fijas, como in situ.

Los denominados betunes mejorados con caucho son los que tienen el nivel menor de incorporación de polvo, mientras que los betunes modificados de alta viscosidad son los que tienen la mayor proporción de polvo de caucho. La clasificación en tipos y la definición de las aplicaciones para cada uno de ellos permitirán mejorar los conocimientos existentes y establecer las oportunas conclusiones acerca de su comportamiento, lo que redundará en la mejora de las técnicas disponibles.

Dado que estos documentos definen las aplicaciones y especifican los materiales y los métodos para el empleo de estos residuos procedentes de los NFU con suficientes garantías para obtener un adecuado comportamiento de las mezclas bituminosas con ellos fabricadas, se ha considerado de interés profundizar en el conocimiento técnico de estos ligantes y, por ello, en este artículo se recogen datos sobre la caracterización reológica de los betunes con caucho, realizada mediante ensayos dinámicos.

Concretamente, en este trabajo se exponen los resultados de los ensayos de caracterización de las propiedades reológicas de varios tipos de betunes modificados y mejorados con polvo de caucho procedente de NFU, tomando como referencia los correspondientes betunes sin modificar.

También se comparan los betunes modificados con caucho con los equivalentes modificados con polímeros para cada tipo, ya que muchas de las características empíricas de estos ligantes son similares. Se caracterizan y comparan entre sí las propiedades reológicas de varios ligantes, a los que se ha incorporado polvo de caucho en diferentes proporciones, con las de betunes asfálticos de la misma penetración y, en su caso, con las de los betunes modificados con polímeros del mismo tipo.

Las propiedades reológicas evaluadas y analizadas han sido el módulo dinámico en cizalla G^* y el ángulo de fase δ , medidos a distintos valores de frecuencia y temperatura, mediante un reómetro de cizallamiento dinámico (DSR). El análisis de las propiedades se ha hecho a través de representaciones gráficas del tipo diagrama de Black y curvas isócronas.

Este artículo pretende aportar información sobre la reología de los diferentes tipos de betunes con caucho, si bien se destaca que los resultados y conclusiones expuestos en esta comunicación se refieren a muestras aisladas de los ligantes estudiados.

PARTE EXPERIMENTAL

1. Productos ensayados

Los ligantes analizados en este estudio han sido los siguientes:

- betún mejorado con caucho de alto módulo BC 20/30.
- betún mejorado con caucho, tipo BC 35/50 y BC 50/70.
- betún modificado con caucho, tipo BMC-2, BMC-3b y BMC-3c.



Figura 1. Reómetro de corte dinámico. Vista general y detalle del dispositivo de platos paralelos con baño de agua.

- betún asfáltico, tipo 15/25, 35/50 y B 50/70.
- betún modificado con polímero, tipo BM-2, BM-3b y BM-3c.

Todos ellos con sus parámetros de análisis dentro de especificaciones, según lo exigido en la Orden Circular 21/2007 sobre el uso y especificaciones que deben cumplir los ligantes y mezclas bituminosas que incorporen caucho procedente de neumáticos fuera de uso, y en los artículos 211 y 212 del PG-3, respectivamente.

Los resultados de la caracterización de todos los ligantes se incluyen en el apartado 4 de este artículo.

2. Método de ensayo empleado

Los ligantes objeto de este estudio han sido caracterizados por medio de un reómetro de corte dinámico (DSR) de deformación controlada (Figura 1), según el procedimiento descrito en la norma UNE EN 14770 – Determinación del módulo complejo y del ángulo de fase por medio de un reómetro de corte dinámico (DSR).

Este método de ensayo permite evaluar el comportamiento viscoelástico de los ligantes bituminosos, gracias a la medida del módulo complejo, G^* , que indica la relación entre la carga aplicada al material y la deformación experimentada por éste, y el ángulo de fase, δ , que da idea de la deformación recuperable y no recuperable del ligante. Estos parámetros son

calculados por el software propio del reómetro tras la aplicación de un movimiento oscilatorio sobre la muestra, que está colocada entre dos platos paralelos (el plato inferior fijo y el plato superior móvil) y con un espesor de película determinado, a diferentes frecuencias y temperaturas de ensayo.

La temperatura de la muestra se mantiene constante entre los dos platos paralelos gracias a un baño de agua que rodea completamente a la muestra durante todo el ensayo.

Para la realización de este estudio, se ha sometido a las muestras de trabajo a un barrido de frecuencias (0,10; 0,16; 0,25; 0,40; 0,63; 1,00; 1,59; 2,51; 4,00; 6,32 y 10,00 Hz) a distintas temperaturas de ensayo, agrupadas en dos barridos determinados:

- El primer barrido se ha realizado a temperaturas intermedias de servicio (10, 20, 30 y 40 °C) con el plato de 8 mm y con un espesor de muestra de 2 mm entre platos paralelos.
- El segundo barrido se ha llevado a cabo a temperaturas altas de servicio (40, 50, 60, 70 y 80 °C) con el plato de 25 mm y con un espesor de muestra de 1 mm entre platos paralelos.

Todos los ligantes han sido caracterizados en el estado original.

Los resultados se han representado en las gráficas siguientes:

- Diagrama de Black: variación del módulo complejo, G^* , con la variación del ángulo de fase, δ .
- Variación isócrona de G^* y de δ con la temperatura, a una frecuencia de 1,59 Hz, que simula el paso del tráfico a una velocidad aproximada de 90 km/h.

RESULTADOS OBTENIDOS

Una vez caracterizados empíricamente todos los ligantes descritos en el punto 2.1, se ha realizado una comparación de las características empíricas y reológicas de:

- los betunes mejorados con caucho con las de los betunes convencionales de penetración similar.
- los betunes modificados con caucho con las de los correspondientes homólogos modificados con polímero.

La comparativa de las propiedades reológicas se ha llevado a cabo utilizando las representaciones del diagrama de Black y de las curvas isócronas de G^* y de d .

En el diagrama de Black se observan dos comportamientos bien diferenciados entre el betún convencional y el betún modificado con polímero: la curva de un betún convencional presenta una tendencia claramente lineal, mientras que la curva de un betún modificado con polímero tiene una forma característica de S (ese), debido a la interacción del comportamiento elástico del polímero elastomérico en el comportamiento viscoelástico del ligante modificado.

Asimismo, esta tendencia también queda reflejada en la representación isócrona de d a 1,59 Hz, donde el valor del ángulo de fase para un betún convencional va a aumentar de forma lineal con la temperatura (mayor viscosidad), mientras que para un betún modificado con polímero se repite de nuevo la curva en forma de S.

En cuanto al valor del módulo complejo, G^* , a 1,59 Hz, la tendencia siempre es lineal para cualquiera de los ligantes incluidos en este estudio, con un aumento del valor de G^* con la disminución de la temperatura. En este caso, la diferencia de comportamiento entre ellos viene dada

por la pendiente de dicha recta, que proporciona una idea de la susceptibilidad térmica del material. Cuanto menor es dicha pendiente, menor es la susceptibilidad térmica que cabe esperar para ese ligante.

CARACTERÍSTICAS	UNIDAD	MÉTODO DE ENSAYO UNE-EN	BC 20/30	B 15/25
Betún original:				
* Penetración (25 °C; 100 g; 5 s)	0,1 mm	1426	24	21
* Punto de reblandecimiento (A&B)	°C	1427	64,4	62,3
* Índice de penetración (IP)	-	12591 anexo A	0,2	-0,4
* Estabilidad al almacenamiento		13399		
- Diferencia punto reblandecimiento	°C	1427	2,4	-
- Diferencia penetración (25 °C)	0,1 mm	1426	6	-
* Recuperación elástica (25 °C; torsión)	%	13398	51	-

Tabla 1. Características de los ligantes BC 20/30 y B 15/25.

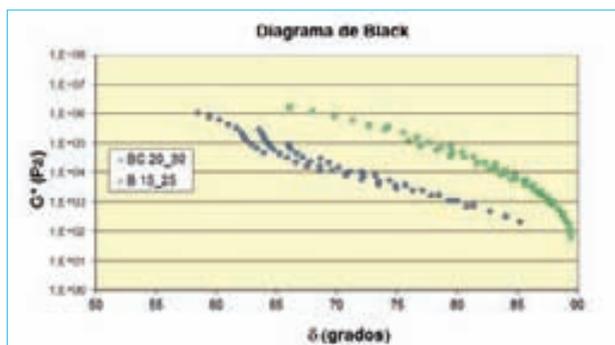


Figura 2. Diagrama de Black de los ligantes BC 20/30 y B 15/25 en estado original.

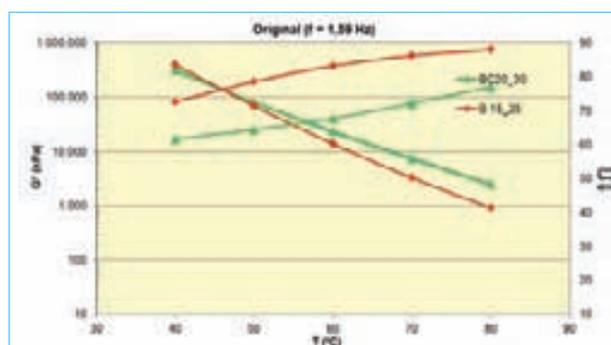


Figura 3. Representación isócrona de los ligantes BC 20/30 y B 15/25 en estado original.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos para cada ligante son los siguientes:

1. Betún mejorado con caucho de alto módulo, BC 20/30

Uno de los ligantes estudiados es un betún de baja penetración para mezclas de alto módulo. Como se muestra en la Tabla 1, el BC 20/30 tiene penetración similar y un punto de reblandecimiento algo superior al de un betún duro del tipo 15/25 y cumple perfectamente con las características requeridas de estabilidad al almacenamiento.

También destaca la recuperación elástica, realizada en este caso mediante el ensayo de torsión, superior al 50%.

En el diagrama de Black (Figura 2) puede verse la tendencia lineal del betún convencional B 15/25, mientras que el BC 20/30 presenta un comportamiento elástico más parecido al de un betún modificado con polímero, con la forma característica de S mencionada anteriormente. Vemos además cómo los valores de ángulo de

fase son inferiores, demostrando un comportamiento más elástico que el betún convencional.

Esto se confirma en la curva isócrona (Figura 3): las propiedades viscoelásticas del BC 20/30 son notablemente mejores que las del betún asfáltico B 15/25, sobre todo en cuanto a ángulo de fase, que es mucho más bajo (ligante más elástico), en todo el rango de temperaturas.

Asimismo, cabe esperar una menor susceptibilidad térmica del BC 20/30 frente a la del betún convencional: a temperaturas intermedias de servicio los valores de G^* son menores que los del betún convencional (menor rigidez), mientras que para altas temperaturas de servicio los valores de G^* son más altos, lo que se traduce en una mayor rigidez y menor deformabilidad.

Todo ello hace prever un mejor comportamiento en mezcla frente a fatiga y deformaciones plásticas que con betún convencional.

2. BC 35/50

Según muestra la Tabla 2, el BC 35/50 tiene penetración similar y un punto de reblandecimiento superior al del B 35/50, mientras cumple perfectamente con las características

requeridas de estabilidad al almacenamiento.

En el diagrama de Black (Figura 4) se aprecia claramente la tendencia lineal del betún convencional B 35/50, mientras que el BC 35/50 presenta el comportamiento elástico más parecido al de un betún modificado

CARACTERÍSTICAS	UNIDAD	MÉTODO DE ENSAYO	BC 35/50	B 35/50
Betún original:				
* Penetración (25 °C; 100 g; 5 s)	0,1 mm	NLT-124	37	41
* Punto de reblandecimiento (A&B)	°C	NLT-125	63,6	54,6
* Índice de penetración (IP)	-	NLT-181	1,0	-0,5
* Estabilidad al almacenamiento		NLT-328		
- Diferencia punto reblandecimiento	°C	NLT-125	2,8	-
- Diferencia penetración (25 °C)	0,1 mm	NLT-124	8	-
* Recuperación elástica (25 °C; torsión)	%	NLT-329	35	-

Tabla 2. Características de los ligantes BC 35/50 y B 35/50.

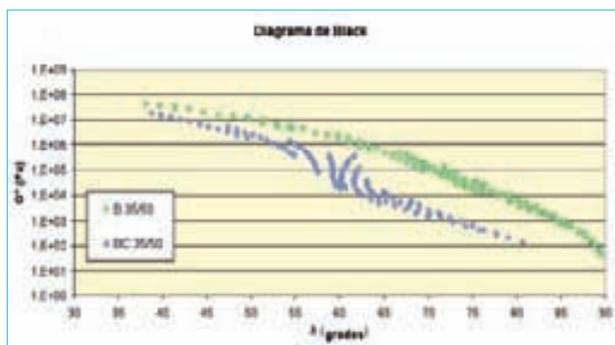


Figura 4. Diagrama de Black de los ligantes BC 35/50 y B 35/50 en estado original.

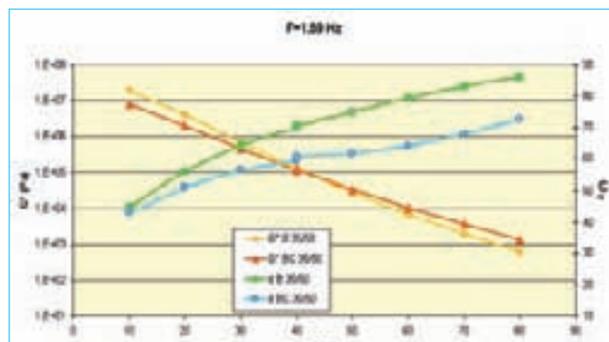


Figura 5. Representación isócrona de los ligantes BC 35/50 y B 35/50 en estado original.

con polímero, con la forma característica de S mencionada anteriormente.

En la curva isócrona (Figura 5) se observa cómo las propiedades viscoelásticas del BC 35/50 son mejores que las del betún asfáltico B 35/50, sobre todo en cuanto a ángulo de fase, que es mucho más bajo (ligante más elástico), en todo el rango de temperaturas.

Asimismo, cabe esperar una menor susceptibilidad térmica del BC 35/50 frente a la del betún convencional: a temperaturas intermedias de servicio los valores de G^* son menores que los del betún convencional (menor rigidez), mientras que para altas temperaturas de servicio los valores de G^* son más altos, lo que se traduce en una mayor rigidez y mejor comportamiento final del ligante en la carretera.

3. BC 50/70

Al igual que en casos anteriores, como muestra la Tabla 3 para el grado 50/70, el betún mejorado con caucho tiene un punto de reblandecimiento superior al del convencional cumpliendo con las características exigidas de estabilidad al almacenamiento.

El BC 50/70 tiene, en este caso, un comportamiento viscoelástico más parecido al del B 50/70, con una ligera

curvatura en la parte central, pero no presenta un grado de elasticidad como cabría esperar para un betún más modificado (curva más acusada). Para un mismo valor de módulo complejo, se ve que el ángulo de fase del BC 50/70 es más bajo que el presentado por el betún asfáltico de penetración similar, sobre todo en la parte central del rango de temperaturas de ensayo (Figura 6).

En la curva isócrona (figura 7) se ve que las propiedades viscoelásticas del BC 50/70 son también mejores que las del betún B 50/70, sobre todo en cuanto a ángulo de fase para todas las temperaturas de ensayo.

Los valores de módulo complejo, G^* , en cambio, son muy similares para los dos ligantes, pero el BC 50/70 también muestra una menor susceptibilidad térmica.

4. BMC-2

En el caso de betunes modificados, ver Tabla 4, se observa que el BMC-2 y el BM-2 (modificado con polímero) tienen unas características muy similares, a excepción de la recuperación elástica, que es menor para el BMC-2.

En la Figura 8 se aprecia que el BMC-2 tiene un comportamiento típico de los betunes modificados con polí-

meros, claramente diferente al que presenta el betún convencional de penetración similar utilizado en esta comparativa, que muestra la modificación producida por el polvo de caucho. Los valores de ángulo de fase del BMC-2 y del BM-2 son muy parecidos

CARACTERÍSTICAS	UNIDAD	MÉTODO DE ENSAYO	BC 50/70	B 50/70
Betún original:				
* Penetración (25 °C; 100 g; 5 s)	0,1 mm	NLT-124	54	60
* Punto de reblandecimiento (A&B)	°C	NLT-125	55	51,7
* Índice de penetración (IP)	-	NLT-181	0,2	-0,3
* Estabilidad al almacenamiento		NLT-328		
- Diferencia punto reblandecimiento	°C	NLT-125	1	-
- Diferencia penetración (25 °C)	0,1 mm	NLT-124	7,5	-
* Recuperación elástica (25 °C; torsión)	%	NLT-329	20	-

Tabla 3. Características de los ligantes BC 50/70 y B 50/70

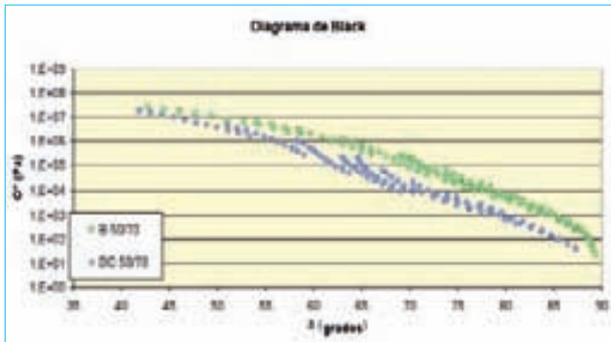


Figura 6. Diagrama de Black de los ligantes BC 50/70 y B 50/70 en estado original.

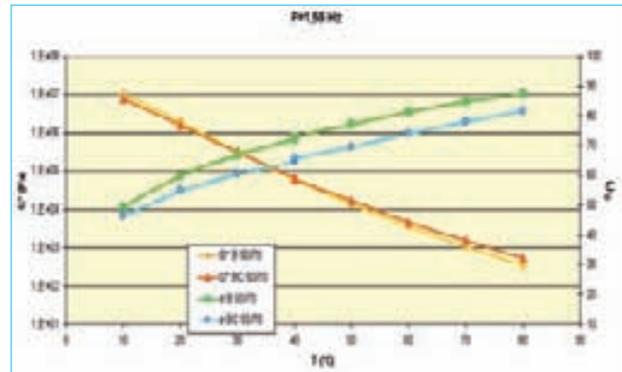


Figura 7. Representación isócrona de los ligantes BC 50/70 y B 50/70 en estado original.

a cualquier valor de módulo complejo.

Las curvas isócronas (Figura 9) muestran que el BM-2 tiene un comportamiento elástico mayor que el BMC-2 a altas temperaturas de servicio (ángulo de fase menor), mientras que a temperaturas intermedias de servicio se comportan prácticamente igual desde el punto de vista reológico. El B 35/50 es claramente el ligante menos elástico de los tres en todo el rango de temperaturas, con valores de δ superiores.

CARACTERÍSTICAS	UNIDAD	MÉTODO DE ENSAYO	BMC-2	BM-2	B 35/50
Betún original:					
* Penetración (25 °C; 100 g; 5 s)	0,1 mm	NLT-124	45	45	41
* Punto de reblandecimiento (A&B)	°C	NLT-125	65	66,5	54,6
* Índice de penetración (IP)	-	NLT-181	1,7	2,0	-0,5
* Estabilidad al almacenamiento		NLT-328			
- Diferencia punto reblandecimiento	°C	NLT-125	4	0,6	-
- Diferencia penetración (25 °C)	0,1 mm	NLT-124	6	2	-
* Recuperación elástica (25 °C; torsión)	%	NLT-329	26	63	-

Tabla 4. Características de los ligantes BMC-2, BM-2 y B 35/50.

5. BMC-3b

En la Tabla 5 se observa que el BMC-3b y el BM-3b tienen características similares, a excepción de la recuperación elástica, que es sensiblemente menor para el BMC-3b.

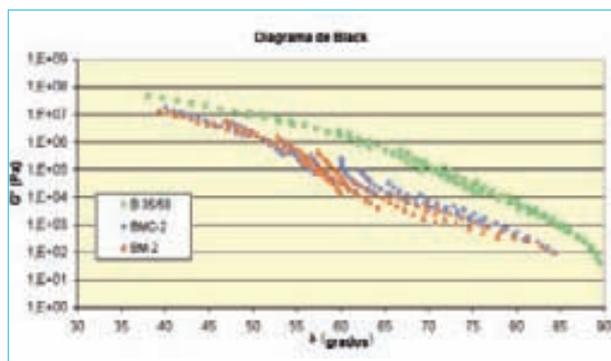


Figura 8. Diagrama de Black de los ligantes BMC-2, BM-2 y B 35/50 en estado original.

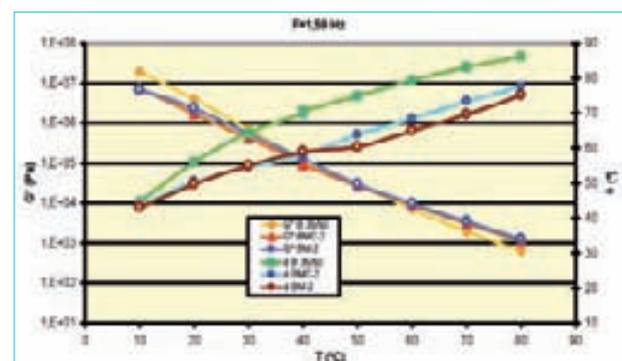


Figura 9. Representación isócrona de los ligantes BMC-2, BM-2 y B 35/50 en estado original.

servicio. Por otro lado, el comportamiento reológico del BMC-3b y del BM-3b es bastante similar, presentando valores de G^* y de d muy parecidos en todo el rango de temperaturas.

CARACTERÍSTICAS	UNIDAD	MÉTODO DE ENSAYO	BMC-3B	BM-3B	B 50/70
Betún original:					
* Penetración (25 °C; 100 g; 5 s)	0,1 mm	NLT-124	55	57	60
* Punto de reblandecimiento (A&B)	°C	NLT-125	60	60	51,7
* Índice de penetración (IP)	-	NLT-181	1,3	1,4	-0,3
* Estabilidad al almacenamiento		NLT-328			
- Diferencia punto reblandecimiento	°C	NLT-125	4	0,4	-
- Diferencia penetración (25 °C)	0,1 mm	NLT-124	9	1	-
* Recuperación elástica (25 °C; torsión)	%	NLT-329	50	69	-

Tabla 5. Características de los ligantes BMC-3b, BM-3b y B 50/70.

6. BMC-3c

En la Tabla 6 se observa que las características del BMC-3c y del BM-3c son muy parecidas, si bien el betún modificado con caucho tiene un punto de reblandecimiento ligeramente superior y, en este caso, la recuperación elástica de ambos ligantes es del mismo orden.

CARACTERÍSTICAS	UNIDAD	MÉTODO DE ENSAYO	BMC-3C	BM-3C	B 50/70
Betún original:					
* Penetración (25 °C; 100 g; 5 s)	0,1 mm	NLT-124	54	55	60
* Punto de reblandecimiento (A&B)	°C	NLT-125	70,8	67	51,7
* Índice de penetración (IP)	-	NLT-181	3,0	2,6	-0,3
* Estabilidad al almacenamiento		NLT-328			
- Diferencia punto reblandecimiento	°C	NLT-125	4	1	-
- Diferencia penetración (25 °C)	0,1 mm	NLT-124	3	1	-
* Recuperación elástica (25 °C; torsión)	%	NLT-329	67	70	-

Tabla 6. Características de los ligantes BMC-3c, BM-3c y B 50/70.

El diagrama de Black (Figura 12) muestra la tendencia claramente lineal del betún convencional B 50/70, frente a las curvas del BMC-3c y del BM-3c, que indica un mayor comportamiento elástico del ligante. Los valores de ángulo de fase del betún modificado con caucho y del betún modificado con polímero son muy parecidos a cualquier valor de módulo complejo.

lógico frente al B 50/70 en cuanto al ángulo de fase en todo el rango de temperaturas.

Por otro lado, el comportamiento reológico del BMC-3c y del BM-3c es bastante similar, aunque en este caso el BMC-3c el ligeramente mejor, con valores de ángulo de fase más bajos, sobre todo en la parte central del rango de temperaturas.

En la curva isócrona (Figura 13) se puede ver que el BMC-3c mejora notablemente su comportamiento reológico

Los valores de G^* son más parecidos para todos los ligantes, aunque sigue destacando el BMC-3c, con una menor susceptibilidad térmica que los otros, ya que G^* es menor a temperaturas intermedias de servicio y mayor a altas temperaturas de servicio (menor pendiente), que para el BM-3c y para el B 50/70.

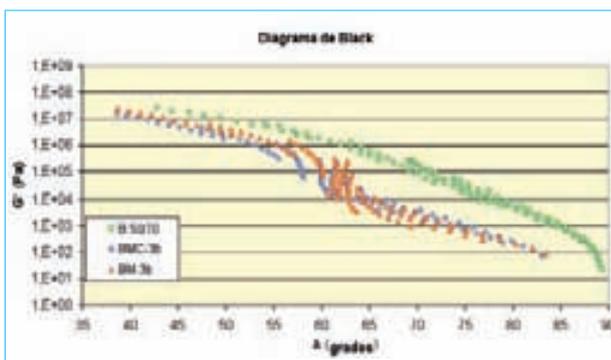


Figura 10. Diagrama de Black de los ligantes BMC-3b, BM-3b y B 50/70 en estado original.

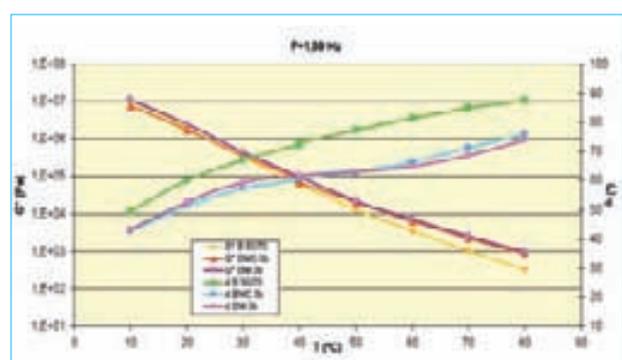


Figura 11. Representación isócrona de los ligantes BMC-3b, BM-3b y B 50/70 en estado original.

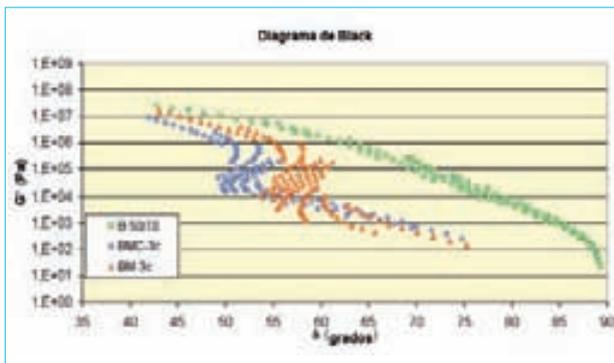


Figura 12. Diagrama de Black de los ligantes BMC-3c, BM-3c y B 50/70 en estado original.

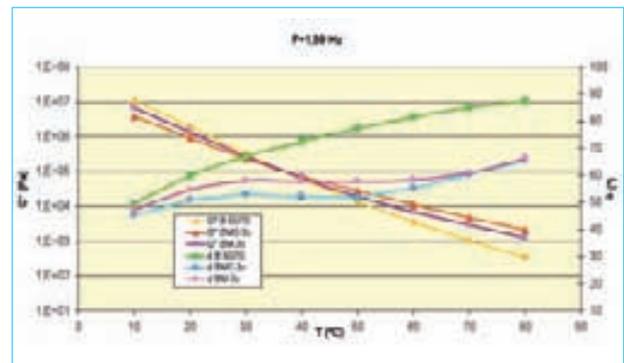


Figura 13. Representación isócrona de los ligantes BMC-3c, BM-3c y B 50/70 en estado original.

CONCLUSIONES

A partir del trabajo experimental realizado, se puede concluir lo siguiente:

- La caracterización reológica de los ligantes, aporta una gran cantidad de información sobre el comportamiento viscoelástico que cabe esperar de cualquier tipo de ligante y efectivamente diferencia entre los diferentes tipos de betunes mejorados y modificados con caucho y los betunes convencionales de similar penetración
- Todos los betunes mejorados con caucho estudiados (BC 20/30, BC 35/50 y BC 50/70), tienen unas propiedades reológicas superiores a las de los betunes asfálticos de penetración similar. En general, la elasticidad de los betunes con caucho se ve mejorada gracias a la presencia de polvo de neumático.
- En la comparación de los betunes modificados con caucho estudiados (BMC-2, BMC-3b y BMC-3c) con sus homólogos modificados con polímeros, las características reológicas de ambos son muy parecidas.

Aunque los resultados obtenidos en este estudio se basan en el ensayo de muestras representativas de cada uno de nuestros productos, debe tenerse en cuenta que podrían obtenerse diferentes resultados en el caso de emplear muestras de otro origen, ya que la formulación y el proceso de producción tiene una incidencia notable en los resultados reológicos.

Sin embargo, considerando todos los resultados presentados en este estudio, se puede concluir diciendo que, desde el punto de vista reológico, cabe esperar un buen funcionamiento en la carretera de los betunes modificados con caucho, dado su carácter elástico, muy similar en la mayoría de los casos al de los betunes modificados con polímeros utilizados hasta la fecha, y un muy buen comportamiento de los betunes mejorados con caucho que pueden ser una opción muy interesante desde el punto de vista técnico, al mismo tiempo que contribuyen a la solu-

ción de un problema medioambiental, por el elevado volumen de neumáticos fuera de uso que permitirían reciclar.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- I. AENOR. (2006). Betunes y ligantes bituminosos. Determinación del módulo complejo de corte y del ángulo de fase. Reómetro de corte dinámico (Dynamic Shear Reometer (DSR)). Norma UNE-EN 14770. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid.
- II. Bohlin Instruments. (1994). A basic introduction to rheology. Bohlin Instruments, Gloucestershire, Reino Unido.
- III. CEDEX. (2007). Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas. Centro de estudios del Transporte – CEDEX, Madrid.
- IV. Gordillo, J.; Bardesi, A. (1995). Los materiales bituminosos y el SHRP (Strategic Highway Research Program). Carreteras, nº 80, pp. 6-22.
- V. Jiménez, R.; Rubio, B.; García, J.; Pérez, I.; Colás, M. M. (2007). Caracterización reológica de un betún con caucho procedente de neumáticos fuera de uso. Ingeniería Civil, nº 148, pp. 97-108.
- VI. Ministerio de Fomento. (2007). Orden Circular 21/2007 sobre el uso y especificaciones que deben cumplir los ligantes y mezclas bituminosas que incorporen caucho procedente de neumáticos fuera de uso. Ministerio de Fomento, Madrid.
- VII. Teugels, W. (2000). The Black Diagram, only a rheological data presentation? 2nd Eurasphalt and Eurobitume Congress, Barcelona.
- VIII. Tomás, R.; Gallego J. "Investigación sobre la reutilización de triturado de neumático en mezclas bituminosas". Revista Carreteras noviembre/diciembre 2003.

Mezclas asfálticas con polvo de caucho NFU: Evaluación acústica en servicio



Santiago EXPÓSITO PAJE

*Laboratorio de Acústica Aplicada a la Ingeniería Civil (LA2IC)
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
Universidad de Castilla-La Mancha
13071 Ciudad Real, España*

RESUMEN

Este artículo de revisión presenta un procedimiento de medida del sonido de interacción neumático-pavimento basado en la metodología denominada CPX; es decir, medida del sonido en la proximidad a la interacción entre el neumático del vehículo y el pavimento. Este método es considerado por el autor como uno de los más apropiados para la medida de la respuesta sonora de la capa superficial del pavimento al paso de vehículos.

El contenido del artículo podría ser de interés para ingenieros de infraestructuras y otros interesados en el diseño de pavimentos, su puesta en obra, y en la evaluación de la contaminación acústica y su gestión.

El sonido de interacción neumático-pavimento está teniendo un creciente interés para diferentes organismos de carreteras, además de para controlar en origen la contaminación acústica asociada al tráfico rodado, para la inspección del estado de mezclas en servicio.

En el marco de diversos y múltiples proyectos, se ha trabajado con el fin de conseguir los objetivos de: (1) desarrollo de metodologías para la medida del sonido de interacción neumático-pavimento, (2) evaluación acústica y superficial de mezclas asfálticas en servicio, (3) establecer una posible correlación de la textura del pavimento con el comportamiento acústico de las mezclas en servicio, (4) desarrollar equipos para la medida de la impedancia mecánica de pavimentos en servicio y (5) contribuir al desarrollo de nuevas mezclas asfálticas más sostenibles.

Palabras clave: *NFU, Capas superficiales del pavimento, Diseño de pavimentos, Contaminación acústica*

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el sonido de interacción neumático/pavimento está teniendo un creciente interés para los departamentos de carreteras y de medioambiente de las distintas administraciones, además de para diferentes laboratorios de investigación. La definición y caracterización de Mezclas Bituminosas Sono-Reductoras (MBSR) es un paso previo para su utilización en medidas de control del ruido ambiental en entornos urbanos.

Por otra parte, es bien conocido que los ensayos no destructivos son una herramienta muy útil para determinar algunas características físicas de los materiales que constituyen el pavimento asfáltico. Entre estos ensayos no destructivos disponibles se encuentran los de tipo acústico. Los más conocidos están basados en la generación de pulsos sonoros o ultrasonoros en ciertos puntos del material, y posteriormente el registro de la respuesta del material mediante sensores situados en diferentes puntos. Otros menos conocidos basados en el registro del comportamiento acústico de un pavimento para capa de rodadura en servicio, en el intervalo de 20 Hz a 20 kHz, se podrían utilizar para determinar, en cierta medida, la idoneidad de la construcción de la capa de rodadura y/o su mantenimiento o estado de conservación.

Además, también es bien conocido que la capa de rodadura alcanza su límite de rendimiento cuando refleja múltiples deterioros causados por la carga continua que supone el paso de vehículos y por una sucesión de factores ambientales. Una determinación precisa del estado funcional del firme en su capa de rodadura es muy importante en ingeniería de materiales de construcción y de los transportes, con el fin de rehabilitar de forma razonable los tramos que muestren un deterioro significativo. En este artículo de revisión se propone la utilización del registro del sonido de interacción de un neumático con el pavimento como ensayo no destructivo para evaluar de forma rápida el estado de deterioro del pavimento asfáltico en su capa de rodadura.

Se ha de señalar, que la uniformidad en la compactación de un pavimento y en su temperatura de extendido se viene considerando como un factor fundamental para que las mezclas asfálticas mantengan sus propiedades de diseño a lo largo del tiempo. Así, una compactación desigual producirá unas propiedades poco uniformes de los materiales que lo constituyen, como por ejemplo en su módulo. Una rigidez no uniforme del pavimento en superficie producirá en el tiempo un envejecimiento prematuro, o un rendimiento inferior al deseado. En los controles de calidad y de

garantía convencionales para la construcción de un pavimento se utilizan habitualmente ensayos puntuales de los materiales o de la estructura. Por ejemplo, la medida de densidad, en un número limitado de testigos extraídos aleatoriamente, se utiliza para comprobar si se alcanza el objetivo de las recomendaciones para la compactación.

La evaluación del rendimiento de la capa de rodadura por medio del registro del comportamiento acústico de pavimentos llevado a cabo de forma continua a lo largo de largos tramos es relativamente reciente. La metodología utilizada en estas investigaciones está basada en una cámara semi-anecoica equipada con neumáticos de referencia, acelerómetros, micrófonos, sensores de temperatura, sistemas de posicionamiento global (GPS), odómetros y ordenadores de abordo para el control, registro y visualización de la respuesta sonora en tiempo real.

Los pavimentos asfálticos con la incorporación de polvo de caucho procedente de neumáticos fuera de uso (NFU) vienen siendo aplicados de forma satisfactoria en numerosos países (Estados Unidos, Suecia, Portugal, Italia, España, etc.) desde hace algunas décadas. Numerosos tramos han sido construidos en países con diferentes tipos de clima. Según diferentes trabajos aparecidos en diversas publicaciones, entre las características más positivas de la utilización de este tipo de mezclas se encuentran propiedades como su durabilidad, su reducción sonora y su influencia en la disminución de reflexión de grietas. Además, constituyen una de las formas de reciclar el caucho procedente de NFU, contribuyendo así a evitar un problema medioambiental.

Algunos estudios han destacado excelentes propiedades en la reducción del ruido de rodadura debidos a la utilización de este tipo de pavimentos. Consecuencia de ello ha sido la sustitución de la superficie de hormigón de muchas autopistas en Estados Unidos, por ejemplo, con pavimentos asfálticos a los que se les ha incorporado polvo de caucho.

Las compañías petroleras tienen los laboratorios de investigación y la tecnología necesaria que les permiten la incorporación de polvo de caucho en betunes para las mezclas asfálticas. En España se consideran, al menos, tres tipos de betunes para mezclas asfálticas elaboradas con polvo de caucho procedente de NFU:

- Betún mejorado con caucho (BC). El porcentaje de polvo de caucho suele estar comprendido entre un 8 % y un 12 % del peso del ligante.

- Betún modificado con caucho (BMC). La cantidad de polvo de caucho es generalmente mayor del 12 % e inferior al 15 % en peso del ligante.
- Betún modificado de alta viscosidad con caucho (BMAVC). Son los que se fabrican con la mayor proporción de polvo de caucho, generalmente entre el 15 % y el 22 % en peso del ligante.

La incorporación del polvo de caucho a una mezcla bituminosa suele hacerse utilizando dos tipos de vías:

- La vía húmeda. En ella se mezcla a elevadas temperaturas el polvo de caucho con el betún para su posterior empleo como ligante en la mezcla bituminosa. Pequeñas cantidades de los componentes más ligeros del betún empapan el polvo de caucho produciendo un aumento del volumen de las partículas de caucho y un endurecimiento del betún. La viscosidad del betún se incrementa permitiendo introducir mayor cantidad de éste en la mezcla bituminosa. Este incremento en la cantidad de betún es el que sería responsable de las reducciones del agrietamiento de los pavimentos por los cambios de temperaturas y por la reflexión de grietas procedentes de capas inferiores, además de incrementar la durabilidad de las mezclas (envejecimiento, oxidación, resistencia al agua, fatiga, etc.). Las modificaciones que la incorporación del polvo de caucho produce en el ligante dependen de un gran número de factores como la composición del betún utilizado, el tiempo de mezclado, el porcentaje y la granulometría del polvo de caucho, así como el método de molienda utilizado para la obtención del polvo de caucho. Algunos estudios han mostrado que pavimentos densos con la incorporación de polvo de caucho ayudaron a reducir el espesor de la capa del pavimento, sin comprometer su comportamiento.
- La vía seca. En este procedimiento se incorpora el polvo de caucho (de tamaños de hasta 2 mm, con dotaciones de alrededor del 2 % de polvo de caucho de peso en mezcla, o de tamaños inferiores a 0.05 mm con dotaciones inferiores) directamente en el mezclador de la central de fabricación de la mezcla bituminosa, junto con el betún y los áridos. El polvo de caucho actúa como parte del árido fino de la mezcla bituminosa. Estudios acústicos de medidas en tramos experimentales han mostrado que este tipo de mezclas asfálticas puede ser efectivo en la reducción del ruido de rodadura.

Este artículo presenta una revisión de los resultados de las investigaciones que viene llevando a cabo el LA²IC desde su creación en el año 2005. En los próximos apar-

tados se mostrarán las propiedades acústicas de numerosos tramos experimentales llevados a cabo en España. La pregunta esencial que nos venimos haciendo y que aún no ha podido ser respondida de forma rotunda es: ¿cuál es el efecto, desde el punto de vista acústico, de añadir polvo de caucho a un pavimento convencional? Un pavimento como por ejemplo el constituido por una mezcla discontinua tipo BBTM o una mezcla tipo SMA (Stone Mastic Asphalt).

TIPOS DE MEZCLAS BITUMINOSAS EVALUADAS

Algunos de los tipos de mezclas bituminosas con polvo de caucho evaluadas en España por el LA²IC son las siguientes:

1. M-10: Mezcla Bituminosa de granulometría discontinua

Mezcla bituminosa con tamaño máximo de árido 10 mm. Los betunes utilizados han sido:

Betún modificado con polímero tipo BM-3c

Betún con adición de polvo de neumático en planta BMPN

Betún BMPN con adición de polvo neumático por vía seca (1 %)

Betún BMPN con adición de polvo neumático por vía seca (2 %)

El contenido de huecos en mezcla está entre el 10-13 %. Las cantidades de betún utilizadas oscilan entre el 5 % y el 5.5 % en peso de mezcla.

2. BBTM 11A (F-10): Mezcla Bituminosa de granulometría discontinua

Mezcla bituminosa con tamaño máximo de árido 10 mm, aunque con mayor contenido en huecos que la M-10 (alrededor del 17 %). El betún utilizado ha sido un betún tipo BM-3c. El contenido de betún en mezcla es de alrededor del 5 %. El contenido de polvo de caucho añadido por vía húmeda está en torno al 13 % en peso de ligante.

3. LB-3: Lechada Bituminosa

Técnica bituminosa de pavimentación en frío elaborada con emulsión modificada con polímeros (ECL-2m) a la que se

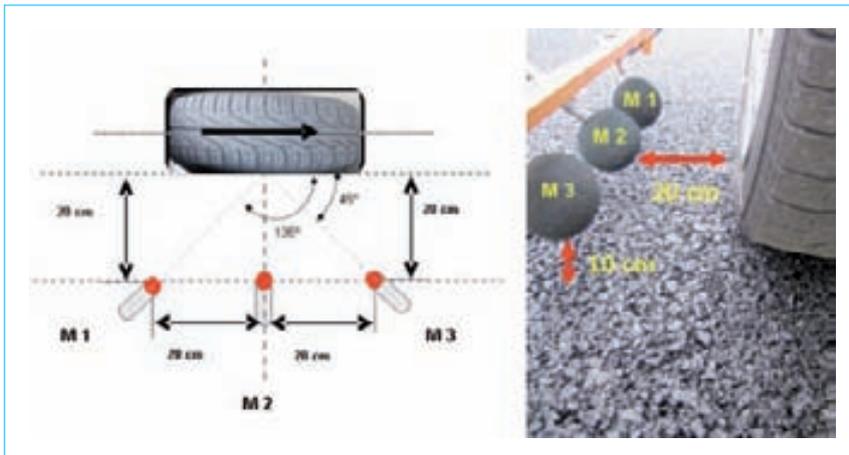


Figura 1. Neumático de referencia y localización de micrófonos en la metodología CPX®.

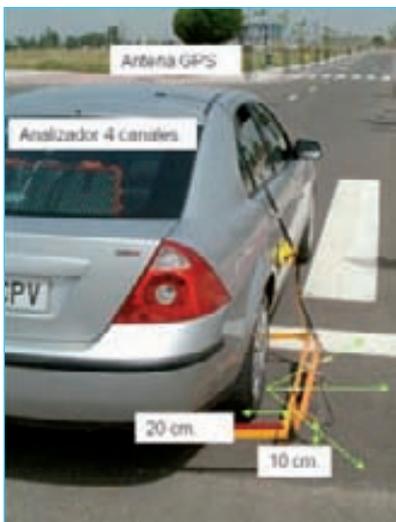


Figura 2. Vehículo convencional para la auscultación de la capa de rodadura®.

le ha incorporado polvo de caucho procedente de neumáticos fuera de uso (NFU) por vía seca. La cantidad de polvo de caucho incorporada es del 7 % en peso de árido, con tamaño del polvo de caucho de entre 2 mm y 4 mm.

Además de la lechada de referencia convencional, lechadas bituminosas tipo LB-3 con 13 % s/a de emulsión tipo ECL-2d-m, también se han preparado distintos tramos experimentales con lechadas bituminosas tipo LB-3 con diferentes contenidos en polvo de caucho incorporados por vía seca, y diferentes tamaños del polvo de caucho. Así, se han estudiado tramos con lechada bituminosa LB-3 con 7 % de polvo de caucho procedente de neumáticos fuera de uso (NFU) de tamaño de partícula 2/4 mm, con 20 % de ECL-2d-m, LB-3 con 21 % de ECL-2d-m (10 % polvo caucho NFU 2-4 mm) y LB-3 con 19 % de ECL-2d-m (7 % polvo caucho NFU 2-7 mm).

4. BBTM 11A BMAVC: Mezcla Bituminosa de granulometría discontinua

Mezcla bituminosa con tamaño máximo de árido de 11 mm. El ligante utilizado ha sido betún de tipo BMAVC (con un 20 % de polvo de caucho sobre el peso del ligante), es decir, betún modificado de alta viscosidad.

La cantidad de ligante utilizada en la mezcla es del orden del 8 %.

5. xSMA11: Mezcla Bituminosa tipo Stone Mastic Asphalt

Mezcla bituminosa con tamaño máximo de árido de 11 mm. El betún utilizado ha sido betún convencional tipo 35/50. Se ha incorporado a la mezcla un 0.5 % de polvo de caucho de peso por vía seca. La cantidad de betún utilizado es del 6 % de peso sobre árido.

Además, hay que resaltar que la granulometría de esta mezcla ha permitido tener una cantidad de huecos en mezcla del 10 %. Señalar también, que los ensayos de control de producción muestran una rigidez alta, en torno a 6000 MPa.

6. xSMA8: Mezcla Bituminosa tipo Stone Mastic Asphalt

Mezcla bituminosa con tamaño máximo de árido de 8 mm. El betún utilizado ha sido un betún de tipo convencional 50/70 aportado en una cantidad de alrededor del 6 % de peso sobre árido. La cantidad de huecos en mezcla está en el 5 %. El espesor de este pavimento lo hace considerarse como capa ultradelgada, muy apropiada para tramos urbanos.

Los espesores de las capas de rodadura elaboradas con mezclas bituminosas con polvo de caucho NFU son generalmente de unos 30 mm para tamaños máximos de áridos de 11 mm, espesores algo superiores para mayores tamaños máximos de áridos y espesores algo inferiores para mezclas con tamaños máximos de áridos inferiores a los 11 mm. En general, la mayoría de las capas de rodaduras estudiadas pueden considerarse como capas delgadas.

Los tramos de ensayo a escala real han sido realizados en autopistas con velocidades límite de 120 km/h, en carreteras nacionales y autonómicas con velocidades límite de 90 km/h, y en tramos urbanos con límites de velocidad inferiores. Estos tramos de ensayos evaluados han venido siendo construidos desde el año 2007 hasta el año 2012.

MÉTODOS DE EVALUACIÓN Y EQUIPOS UTILIZADOS

1. Introducción

La metodología utilizada por el LA²IC para la evaluación de mezclas asfálticas en servicio mediante téc-

nicas acústicas está basada en el método denominado CPX, utilizando tanto un vehículo convencional como una cámara semianecoica, el TireSonicMk4-LA²IC del Laboratorio de Acústica Aplicada a la Ingeniería Civil. Diferentes neumáticos de referencia han venido siendo utilizados entre los que destacamos el Pirelli P6000, por considerarlo representativo de los neumáticos de vehículos ligeros en España. Las velocidades de referencia utilizadas han sido, por lo general, los 50 km/h, los 80 km/h y los 110 km/h.

Para complementar la auscultación acústica de pavimentos con polvo de caucho en servicio, además de ensayos de laboratorio, se han llevado a cabo medidas del perfil de la capa de rodadura con un perfilómetro laser montado sobre el equipo de ensayo. El registro del perfil de los tramos de ensayo nos ha permitido calcular tanto la MPD (Mean Profile Depth) como el espectro de textura. El parámetro MPD es ampliamente utilizado para describir la macrotextura de la superficie de un pavimento, aunque su relación con la generación del ruido de rodadura no está claramente establecida, a pesar de la existencia de algunos trabajos en este sentido, publicados en revistas de prestigio.

El método denominado Close Proximity (CPX method) está basado en la medida y el registro de los niveles sonoros generados durante la rodadura de un neumático de referencia sobre el pavimento que se quiere auscultar. Permite caracterizar, a través de la emisión sonora, la homogeneidad longitudinal y el comportamiento acústico de la capa de rodadura en tramos extensos. Para ello es necesario realizar los ensayos a velocidades por encima de los 30 km/h, en donde el sonido de rodadura es el dominante.

2. Principios

Al menos dos micrófonos localizados en las cercanías de la zona de interacción neumático/pavimento, ver Figura 1, miden el nivel sonoro equivalente con ponderación-A, generado por diferentes neumáticos de referencia durante la rodadura sobre el pavimento que se quiere evaluar, a una velocidad determinada.

Los neumáticos se pueden montar en un vehículo convencional, ver Figura 2, o en un remolque con una cámara que absorbe gran parte del sonido que le llega procedente del pavimento, evitando así reflexiones no deseadas (Figura 3).



Figura 3. TireSonicMk4-LA2IC y localización de micrófonos[®].

3. Procedimiento

Durante la auscultación, el vehículo se desplaza a lo largo de la zona de ensayo, registrando los micrófonos los niveles sonoros L_{CPX} en dB(A) cada segmento de cierta distancia (10 m, por ejemplo).

Durante el ensayo, la velocidad se mantiene constante, en la medida de lo posible, en la velocidad de referencia seleccionada (por ejemplo: 50 km/h, 80 km/h, 110 km/h o cualquier otra velocidad que resulte de interés para la evaluación).

En cada segmento recorrido Δl , el nivel sonoro continuo equivalente con ponderación A se determina según:

$$L_{Aeq}[\Delta l] = 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{1}{l_2 - l_1} \int_{l_1}^{l_2} \frac{P^2_{ref}(x)}{P^2_{ref}} dx \right]$$

Posteriormente, las señales de los micrófonos nos permiten obtener un valor medio. Este valor es corregido por velocidad. Para ello se utiliza la expresión siguiente, ver por ejemplo [4]:

$$L_{corr} = L_{me} - B \cdot \log\left(\frac{v}{v_{ref}}\right)$$

siendo v_{ref} la velocidad de referencia seleccionada, v la velocidad registrada en cada momento y B la constante de velocidad, que se determina a partir de la medición del nivel sonoro frente a la velocidad. En la Figura 4 se muestra un ejemplo de cómo obtener el parámetro B .

Se pueden realizar diferentes pasadas en el tramo de ensayo, con el fin de estudiar la repetitividad, y utilizar diferentes neumáticos de referencia, por ejemplo los presentados en la Figura 5, junto con una cámara semianecoica.

Los sistemas de medida basados en la metodología CPX permiten la evaluación de la superficie de la carretera (evaluación de pavimentos en servicio) de forma geo-referenciada [5]. Así, la Figura 6 muestra las coordenadas GPS registradas durante una auscultación acústica de mezclas tipo SMA11 y SMA16 en la CV-43, y xSMA11 con alto contenido en huecos y con la incorporación de polvo de caucho NFU, en la AP-4.

Este tipo de geo-auscultación permite la correlación de niveles sonoros con coordenadas de posicionamiento, dando lugar a mapas que muestran el estado de la vía [5, 8].

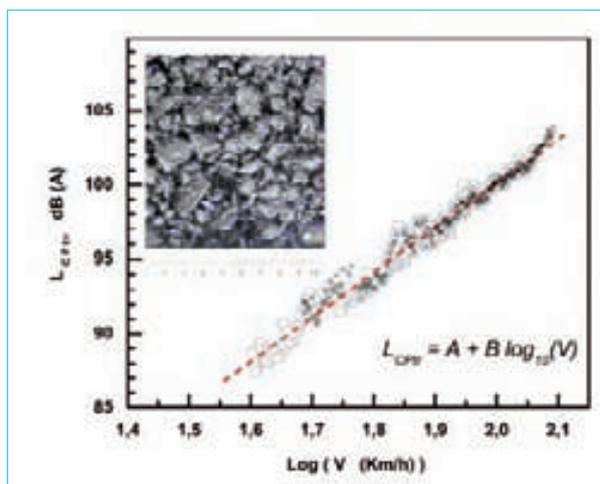


Figura 4. Regresión lineal del nivel sonoro frente a la velocidad para la obtención de la constante de velocidad B en una mezcla drenante (PA) ⁽⁹⁾.



Figura 5. TireSonicMk4-LA²IC, mostrando el interior de la cámara con la localización de micrófonos, y neumáticos de referencia ⁽⁹⁾.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Los resultados de algunos de los tramos experimentales evaluados por el LA²IC se muestran en este apartado.

1. Mezclas bituminosas tipo M-10 en la B-140 con polvo de caucho

Cuatro diferentes tramos experimentales de mezclas tipo M-10, algunos de ellos con la incorporación de polvo de caucho NFU, incorporado tanto por vía seca como por vía húmeda fueron extendidos en la carretera comarcal B-140 en Barcelona.

Los resultados acústicos de algunos de los tramos experimentales evaluados por el LA²IC se muestran a conti-

nuación. La Figura 7 presenta una foto aérea del tramo experimental y la distribución de los distintos tramos con sus mezclas correspondientes.

Un tramo experimental de unos 800 metros de longitud, con 4 mezclas diferentes, en la carretera B-140 entre Sabadell y Santa Perpetua de Mogoda en Barcelona, ver Figura 7, fue auscultada acústicamente con cámara semi-anecoica. Estas medidas tienen la intención de caracterizar acústicamente diferentes mezclas M-10 con diferente contenido en polvo de caucho procedente de neumáticos fuera de uso, introducido tanto por vía seca como por vía húmeda.

Se realizaron diferentes pasadas con el equipo de medida TireSonicMk4-LA²IC sobre los cuatro subtramos de la

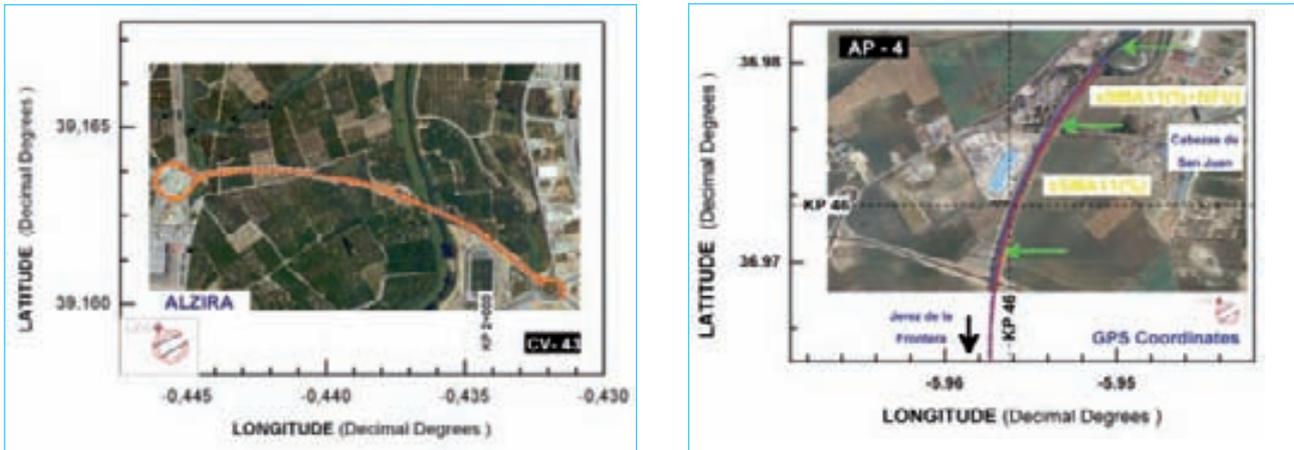


Figura 6. Trazado con coordenadas GPS de los tramos de ensayo con mezclas SMA^(M, V).

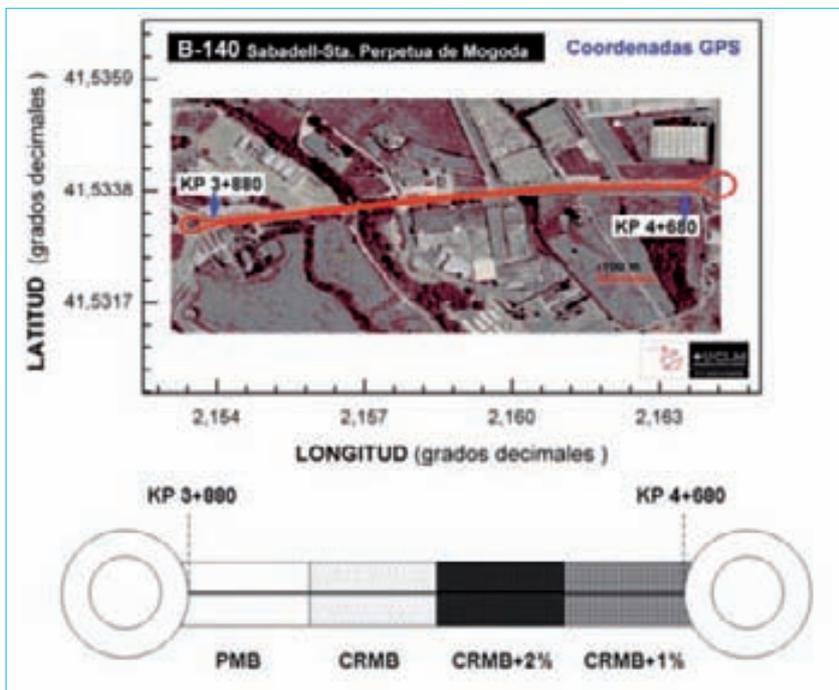


Figura 7. Registro de coordenadas GPS y tramos de ensayo con mezclas M-10^(M)

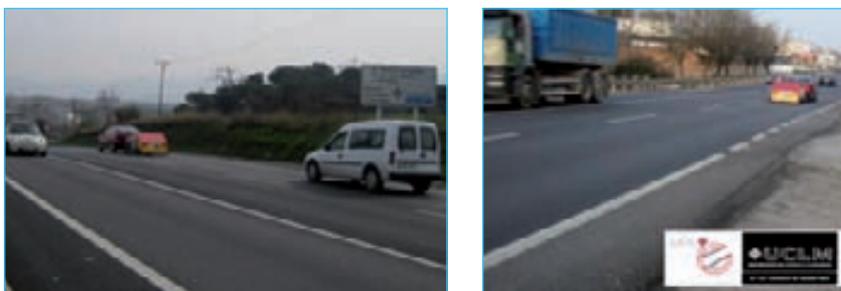


Figura 8. Tramo de ensayo con algunas de las mezclas M-10 auscultadas^(M)

Las medidas fueron realizadas con 3 neumáticos de referencia diferentes, a una velocidad de referencia de 50 km/h, por tratarse de un tramo limitado en velocidad a 60 km/h. La Figura 9 y Figura 10 muestran, respectivamente, la textura de las mezclas analizadas y los neumáticos de referencia utilizados durante la auscultación.

El análisis de las medidas realizadas con el neumático Pirelli P6000 indican que en el tramo analizado en sentido Sabadell, después de la corrección de las medidas acústicas por velocidad, existirían diferencias apreciables entre las 4 mezclas (BMC+1%, BMC+2%, BMC y BMC-3C) en las propiedades acústicas (niveles globales medios y espectros medios 1/3 - octava). Estos resultados proceden de un análisis de las medidas realizadas sobre 100 m de los 200 m de que consta cada subtramo, y de la media aritmética de los valores registrados por dos micrófonos (Delantero y Trasero) situados junto al neumático de referencia. Los valores de la temperatura del pavimento y de la temperatura ambiente no variaron apreciablemente durante los ensayos realizados, al menos para modificar apreciablemente los resultados cualitativos que se señalan.

citada carretera con el fin de caracterizar acústicamente cada una de las mezclas existentes (medida del ruido de rodadura en campo próximo). La Figura 8 muestra algunas fotos durante los ensayos en los dos sentidos.

Los valores medios de los niveles registrados a 50 km/h indicarían, aproximadamente, una variación entre niveles medios asociados a cada mezcla con la incorporación de polvo de caucho NFU, en el sentido Sabadell, de entre

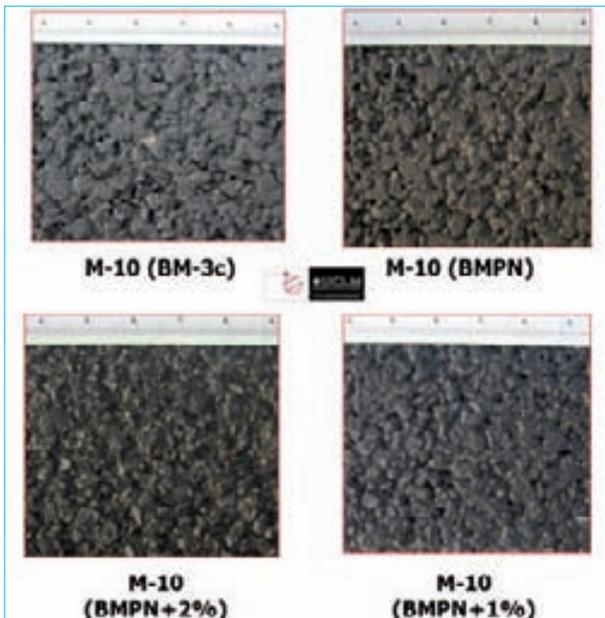


Figura 9. Aspecto de la textura superficial de las mezclas M-10 auscultadas®



Figura 10. Neumáticos de referencia utilizados durante la auscultación acústica

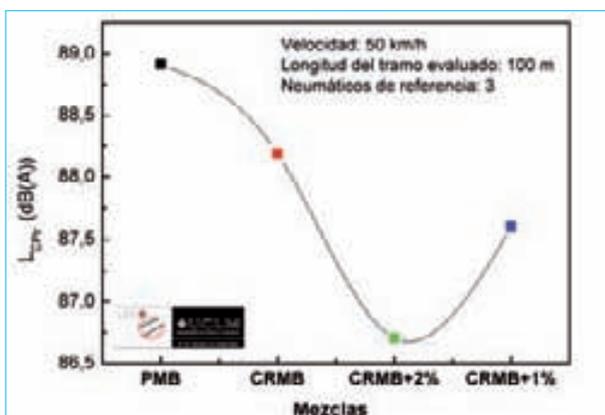


Figura 11. Niveles sonoros de proximidad asociados a las diferentes mezclas M-10.

88 dB(A) y 86 dB(A), considerando la misma velocidad de referencia, y como valor medio de los diferentes neumáticos de referencia, y a la misma temperatura. La Figura 11 muestra un resumen de los resultados sonoros

obtenidos y del comportamiento de cada mezcla en el orden en que fueron extendidas.

La Figura 12 muestra el espectro sonoro medido en proximidad para las mezclas bituminosas M-10 con la adición de polvo de caucho y la mezcla de referencia, entre 200 Hz y 7 kHz. Como se puede observar, los cambios más significativos se producen para las mezclas M-10 con la incorporación de polvo de caucho por vía seca. La mezcla con un 2 % de polvo de caucho es la que presenta a todas las frecuencias un mejor comportamiento sonoro.

Estos resultados (niveles medios asociados a cada mezcla) no se vuelven a repetir en idéntica forma en las mezclas del tramo en sentido Santa Perpetua de Mogoda. En este tramo, la mezcla elaborada con ligante BM-3c, el tramo de referencia, presenta un espectro en frecuencias totalmente diferente a los espectros encontrados para las mezclas elaboradas con la adición de polvo de caucho, tanto por vía húmeda como por vía seca, además de ser diferente al espectro de la misma mezcla en el tramo de sentido a Sabadell.

Ahora bien, los resultados cualitativos obtenidos por tramos y sobre mezclas, se reproducen con diferentes pasadas y neumáticos de referencia utilizados.

Estas variaciones en los valores del nivel sonoro de proximidad para un mismo tipo de mezcla en los diferentes tramos construidos podrían indicarnos la importancia de la puesta en obra, el trazado de la vía, las diferentes condiciones de circulación de cada tramo, entre otros factores, en el comportamiento en servicio de una mezcla.

Ahora bien, los resultados de los niveles sonoros de cada mezcla nos indicarían, atendiendo a la certificación acústica de mezclas propuesta por el LA2IC (ver apéndice), que la mezcla bituminosa tipo M-10 elaborada con betún modificado con polvo de caucho NFU, y al que se le ha añadido un 2 % de polvo de caucho en peso de árido sería una Mezcla Bituminosa Sono-Reductora Clase A para la velocidad de 50 km/h, en el momento de la certificación (Figura. 13).

Conviene señalar, para finalizar, el rápido deterioro que sufrió la mezcla bituminosa M-10 (BMPN+2% PN) elaborada con alto contenido en polvo de caucho introducido por vía seca. Este hecho vuelve a poner de manifiesto la gran influencia que una apropiada fabricación de la mezcla y/o ejecución del tramo con este tipo de mezclas experimentales tenía hace unos años en las características funcionales del pavimento.

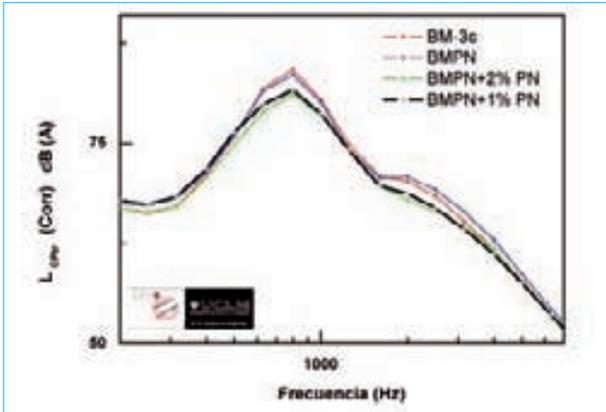


Figura 12. Espectros sonoros de proximidad asociados a las diferentes mezclas M-10.



Figura 13. Eco-Etiqueta de acreditación de la capacidad sono-reductora para la Mezcla Bituminosa M-10 (BMPN+2% PN) extendida en la B-140, como Clase A, para una velocidad de 50 km/h, acreditado por el LA2IC.

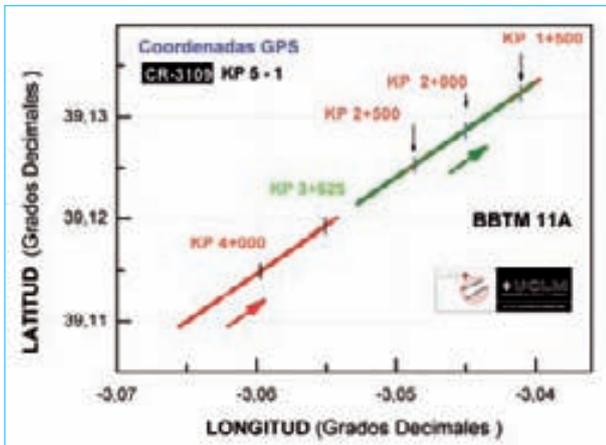


Figura 14. Registro de coordenadas GPS de los tramos de ensayo con mezclas BBTM 11A⁽⁹⁾.



Figura 15. Detalle de la puesta en obra de la capa de rodadura en la CM-3106.

2. Mezcla bituminosa tipo BBTM 11A (F-10) en la CM-3106. Polvo de caucho vía húmeda

En el tramo experimental de la CM-3106 en la provincia de Ciudad Real, el Laboratorio de Acústica Aplicada a la Ingeniería Civil (LA²IC) de la Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM) realizó un estudio sobre el efecto que tiene la adición del polvo de caucho procedente de la trituración de neumáticos fuera de uso (NFU) en el betún, sobre el comportamiento acústico de una mezcla delgada con granulometría discontinua para capa de rodadura. Las emisiones sonoras fueron registradas utilizando la metodología CPX (Close Proximity) o de proximidad. Dos tramos experimentales fueron construidos para su posterior estudio. Uno de ellos con la incorporación de polvo de caucho por vía húmeda y otro de referencia, con el mismo tipo de mezcla pero sin la incorporación de polvo de caucho (Figura.14). Las capas de rodadura fueron construidas dos meses antes de llevar a cabo la auscultación acústica y el registro de los perfiles de la superficie de la carretera.

Los tramos mostrados en la Figura 14 son dos tramos experimentales a escala real de unos 2.5 km de longitud, sin y con la adición de caucho incorporado por vía húmeda en una proporción del 13 % en peso del ligante. Los dos tramos estudiados fueron construidos con una mezcla para capa de rodadura tipo BBTM 11A de unos 2 cm de espesor. Los ligantes utilizados fueron un betún tipo BM-3c mejorado con caucho procedente de polvo de neumático y un betún modificado con polímero tipo BM-3b.

Debido a la influencia que tiene sobre la homogeneidad acústica de las capas de rodadura la fabricación de la mezcla, el traslado y extendido de la misma, se puso especial atención por parte de la Delegación Provincial de Ordenación del Territorio y Vivienda de Ciudad Real, de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha, en una puesta en obra de ambos tramos en las condiciones más óptimas (Figura 15).

Los tramos experimentales están ubicados en la carretera CM-3109, entre los PKs 0+700 y 5+620, en las cercanías de la localidad de Tomelloso. Además de diferentes campañas de auscultación acústica, se desarrollaron campañas de medida de los perfiles de la carretera para el cálculo de la macrotextura y su posterior correlación con el ruido de rodadura generado. También fueron llevadas a cabo distintas medidas de la macrotextura con un láser estático (ver Figura 16).



Figura 16. Detalle durante un registro del perfil de la vía en 2D de forma estática para el cálculo de la textura.



Figura 17. Detalle de los tramos experimentales y de la textura de las mezclas BBTM 11A con y sin polvo de caucho NFU.

La Figura 17 muestra el detalle de la textura de las mezclas BBTM 11A analizadas en este estudio y el tramo de ensayo en el que se llevó a cabo la auscultación acústica.

El equipo con el que se ha realizado la geo-auscultación acústica es el denominado TireSonicMk4-LA IC (ver Figura 5). Se utilizó el neumático de referencia Pirelli P6000 para las medidas de los niveles a diferentes velocidades (50 km/h, 80 km/h y 110 km/h).

El estudio llevado a cabo en este tramo experimental muestra que algunas de las afirmaciones comúnmente aceptadas sobre el sonido emitido por las mezclas bituminosas con la incorporación de polvo de caucho procedente de NFU no siempre se cumplen. La incorporación de polvo de caucho por vía húmeda a una mezcla bituminosa para capas delgadas no ha significado en este estudio una reducción del sonido de rodadura. Los porcentajes utilizados en esta investigación para el polvo de caucho incorporado por vía húmeda no garantizan una reducción sonora. También se ha demostrado la importancia que la tex-

tura final de las mezclas bituminosas con granulometría discontinua para capas de rodadura puede tener en las emisiones sonoras a velocidades superiores a 40 km/h.

En la Figura 18 se muestra el resultado de la auscultación acústica de cada uno de los tramos. Los valores medios del nivel sonoro de proximidad global registrados a una velocidad de 80 km/h para la mezcla BBTM 11A con betún BM-3c modificado con polvo de caucho es de unos 97 d B(A), mientras que para la mezcla con betún BM-3b el nivel sonoro medio global es de unos 95.5 d B(A), a la misma velocidad. La diferencia es de unos 1.5 d B(A).

Dado que el contenido de huecos de la mezcla más sonora es mayor, podemos afirmar que la cantidad de huecos no garantiza una disminución significativa del ruido de rodadura. La mezcla que presenta una mayor macrotextura es la que contiene polvo de caucho. La mayor macrotextura, es el aspecto que parece hacer de la mezcla BBTM 11A BMC la más ruidosa.

La Figura 19 compara los espectros del sonido de proximidad registrados a lo largo del tramo de ensayo. Como se puede apreciar, la mezcla con betún BMC presenta mayor ruido de rodadura a bajas frecuencias (por debajo de 1 kHz), en donde dominan los mecanismos de impacto y vibraciones del neumático de los vehículos. Conviene recordar que esta es la mezcla con mayor macrotextura (1.3 mm frente a los 1 mm de la mezcla con betún BM-3b).

Por otra parte conviene destacar que la mezcla con menor macrotextura presenta unos niveles sonoros mayores a altas frecuencias, en donde los mecanismos aerodinámicos son los dominantes en la generación del sonido.

El comportamiento descrito anteriormente para velocidad de rodadura de 80 km/h se vuelve a repetir a diferentes velocidades. Así, para la velocidad de 50 km/h obtenemos niveles sonoros de proximidad medios, sin corrección por velocidad, de unos 89 d B(A) para la mezcla sin polvo de caucho y de 89.8 d B(A) para la mezcla con betún modificado con caucho. Para una velocidad de 110 km/h, los niveles medios en los tramos experimentales resultan ser unos 100 d B(A) para la mezcla con polvo de neumático y de unos 99.6 d B(A) para la que no contiene polvo de caucho NFU. Por los resultados obtenidos, sólo la mezcla BBTM 11A BMC podría llegar a considerarse como mezcla bituminosa sono-reductora Clase A, ver Anexo.

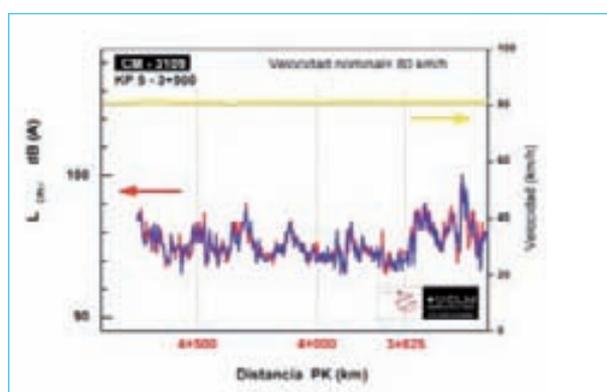
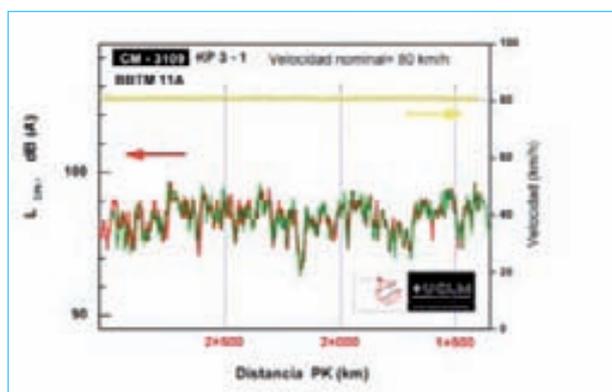


Figura 18. Resultados de la auscultación acústica de los tramos con y sin polvo de caucho NFU registrado a 80 km/h. Detalle de la repetitividad de la auscultación del sonido de proximidad.

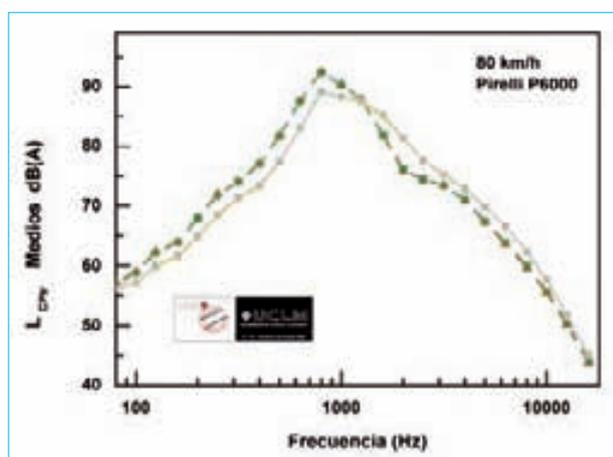


Figura 19. Espectros sonoros de sonido de proximidad. En color verde (*) la mezcla BBTM 11A con polvo de caucho NFU incorporado por vía húmeda.

De los tramos experimentales de la CM-3109 con una capa delgada de rodadura tipo BBTM 11A (F-10), sin y con polvo de caucho procedente de NFU incorporado por vía húmeda, y después de unos meses desde su puesta en servicio, podemos sacar las siguientes conclusiones:

- La adición de polvo de caucho, incorporado al betún por vía húmeda (13 % en peso del ligante), no parece ser garantía para conseguir mejorar la capacidad de reducción sonora de mezclas bituminosas en capas delgadas con granulometría discontinuas.
- El contenido en huecos de las mezclas BBTM 11A estudiadas no tienen una influencia significativa en la reducción de los niveles sonoros registrados en proximidad. Así, la mezcla más sonora es la que posee un mayor contenido de huecos en mezcla: un 17 %, frente a un 10 % de la mezcla menos sonora.
- Existen características superficiales que hay que tener muy presente en el estudio de la influencia de la emisión sonora, y que permitirían explicar el comportamiento acústico de

las mezclas en servicio. En este estudio llevado a cabo en el tramo experimental de la CM-3106, la macrotextura parece tener más peso que el contenido en huecos de las mezclas para explicar su comportamiento acústico.

A lo largo de los años se han llevado a cabo diferentes campañas de auscultaciones acústicas y de las características de la superficie de la vía, medidas de forma simultánea. Este trabajo nos ha permitido evaluar en el tiempo la posible resistencia al envejecimiento de las mezclas con polvo de caucho incorporado por vía húmeda y, por tanto, su previsible incremento en su vida de servicio. Como resultado inicial podemos destacar que las variaciones en la capacidad sono-reductora por las mezclas bituminosas al cabo de un año desde su puesta en servicio no son significativas^(X).

3. Lechada bituminosa LB-3 con polvo de caucho en la CM-4106

Este estudio tiene como finalidad desarrollar nuevos tratamientos superficiales con Lechadas Bituminosas (NFU) para la renovación superficial del pavimento que, además de sus buenas propiedades de resistencia al deslizamiento y de rugosidad (elevada macrotextura de tipo positivo), presenten mejores comportamientos acústicos. Al mismo tiempo, con el uso de polvo de caucho procedente de neumáticos fuera de uso sustituyendo una parte del árido que constituye la lechada, y el hecho de ser una técnica de extendido en frío, estas mezclas poseerán unas características medioambientales únicas, si se consiguen que sean catalogadas como MBSR.

Para conseguir este tipo de mezclas sono-reductoras es imprescindible conocer los mecanismos involucrados en la generación y emisión sonora de las capas de rodadura de las lechadas bituminosas con y sin polvo de caucho procedente de neumáticos fuera de uso, y también, compararlas con otro tipo de mezclas en caliente.

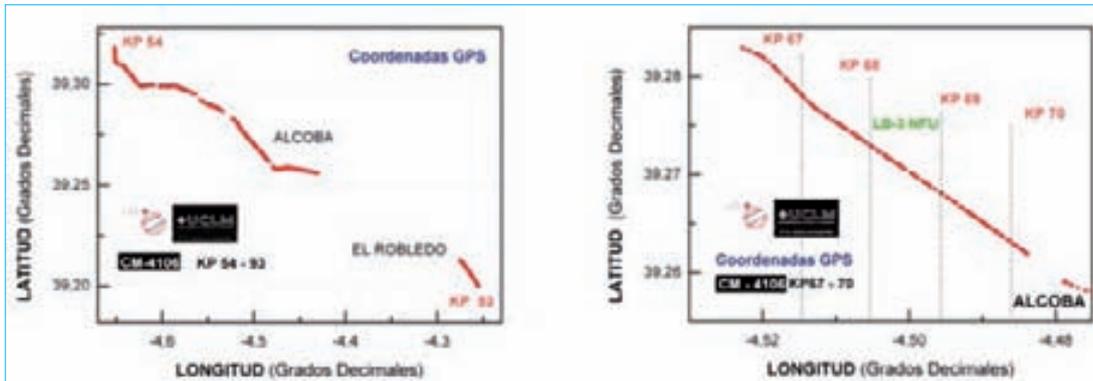


Figura 20. Localización GPS de los tramos de ensayo con LB-3 registrados durante las campañas de medida acústica en la CM-4106 - Ciudad Real.



Figura 21. Detalle del tramo experimental y de la superficie de la lechada LB-3 construida en el PK 56+000. En rojo la evolución al cabo de un año desde su puesta en obra.



Figura 22. Detalle de del tramo experimental y de la superficie de la lechada LB-3 con polvo de caucho NFU construida en el PK 68+000. En rojo la evolución al cabo de un año desde su puesta en obra.

Un tramo experimental a escala real con lechadas bituminosas LB-3 fue construido en la carretera CM-4106, en la provincia de Ciudad Real. Para la incorporación del polvo de caucho se utilizó la vía seca; es decir, incorporándolo

directamente en la mezcla a temperatura ambiente. El tamaño del polvo de caucho utilizado es de 2-4 mm. Como ligante se utilizó una emulsión convencional tipo ECL-2m (modificada

con polímeros). La cantidad de polvo de caucho utilizado es variable, entre el 5 y el 10 % de peso en árido.

Uno de los objetivos de este estudio fue la caracterización del ruido de interacción neumático/pavimento de mezclas tipo lechada bituminosa. La Lechada Bituminosa NFU está situada en torno al PK 68+000 de la citada vía (Figura 20). A los dos meses de la puesta en obra del tramo experimental se llevaron a cabo diferentes campañas de auscultación por parte del LA²IC. Además fueron construidos tramos de lechadas de referencia, fabricadas sin la incorporación de polvo de caucho. El estudio de auscultación de los tramos de ensayo fue completado con campañas de medida del perfil de la vía para el posterior cálculo de la textura geo-referenciada (macrotextura) y medidas en laboratorio de la absorción acústica de diferentes testigos de lechadas bituminosas, con y sin polvo de caucho, y de testigos extraídos de los tramos de ensayo.

Las medidas realizadas sobre capas de rodadura de Mezclas Bituminosas en Caliente (MBC) nos permitirán comparar el comportamiento acústico de éstas con las Lechadas, o utilizarlas como referencia. Las Figuras 21 y 22 nos muestran detalles de los tramos de ensayo y de la mezcla extendida y su evolución en el tiempo.

superficie de la lechada LB-3 con polvo de caucho NFU construida en el PK 68+000. En rojo la evolución al cabo de un año desde su puesta en obra.

Para realizar las medidas de campo se ha utilizado una metodología y equipos puestos a punto en el LA²IC para medir exclusivamente las características acústicas de las capas de rodadura en carretera (exclusivamente sonido de rodadura. Además se utilizaron equipos para la medida del perfil de la carretera, para posteriormente calcular la MPD. También fue utilizado un equipo para la medida del perfil de la superficie en 2D, para el cálculo posterior

de dicho parámetro. La Figura 23 muestra estos equipos.

Se midieron los niveles sonoros en campo próximo

(sonido de rodadura), LCPtr, a una velocidad de referencia de 80 km/h con el neumático de referencia Pirelli P6000 y los perfiles de forma estática 2D y dinámica.

Se ha obtenido una reducción en los niveles sonoros globales, LCPtr (Niveles del Sonido de Rodadura), superiores a 1.5 dB(A) para la lechada LB-3 con un 7 % de polvo de caucho de NFU con respecto al mismo tipo de lechada bituminosa sin la adición de polvo de caucho. En algunos de los subtramos estudiados, esta diferencia entre lechadas LB-3 “nuevas” con y sin polvo de caucho llega a ser superior a 2.5 dB(A) (www.proyecto-fenix.es). Los estudios preliminares de la macrotextura en los tramos de ensayo indican que este resultado no es debido a una mayor macrotextura en las lechadas sin polvo de caucho. La Figura 24 muestra el resultado de los niveles sonoros de proximidad durante una auscultación acústica.

Como se puede observar, la homogeneidad acústica del tramo de ensayo es variable. A pesar de ello se obtienen valores medios del nivel sonoro de proximidad LCPtr de unos 96 dB(A) para la lechada que incorpora el polvo de caucho por vía seca y de unos 98.5 dB(A) para la lechada sin polvo de caucho, denominada de referencia.



Figura 23. Detalles de los equipos del LA²IC utilizados en la auscultación del tramo experimental de la CM-4102: TireSonicMk4-LA²IC, LaserDynamicPG-LA²IC y láser 2D estático.

También se puede afirmar que en una primera auscultación, los niveles sonoros globales LCPtr registrados en el tramo experimental con la lechada LB-3 con un 7 % de polvo de caucho de NFU son comparables a los niveles globales registrados en una mezcla bituminosa, que hemos denominado como MBC “antigua”. La Figura 25 muestra los espectros sonoros medios registrados a 80 km/h en el tramo de ensayo, medidos en proximidad (CPX). Como se observa, las lechadas bituminosas emiten más ruido a bajas frecuencias, por debajo de 1 kHz. La incorporación de polvo de caucho parece disminuir esta emisión a bajas frecuencias. A altas frecuencias, en donde los mecanismos aerodinámicos son los dominantes, las lechadas estudiadas y la mezcla bituminosa convencional se comportan de forma similar.

Se ha podido observar que los espectros sonoros en las lechadas con y sin polvo de caucho indicarían que en las primeras, los mecanismos de generación sonora por impacto y vibraciones de los neumáticos de los vehículos durante la rodadura se han conseguido disminuir apreciablemente (ver Figura 25).

Por otra parte, como se puede apreciar en la Figura 24, los niveles registrados del sonido de rodadura pue-

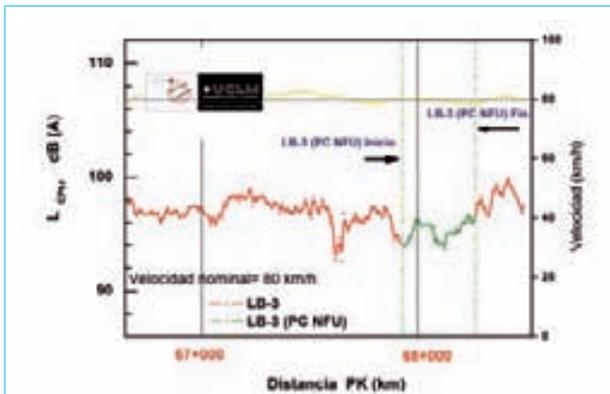


Figura 24. Evolución de los niveles sonoros de proximidad en los tramos de ensayo para una velocidad nominal de 80 km/h registrado con el neumático de referencia Pirelli P6000.

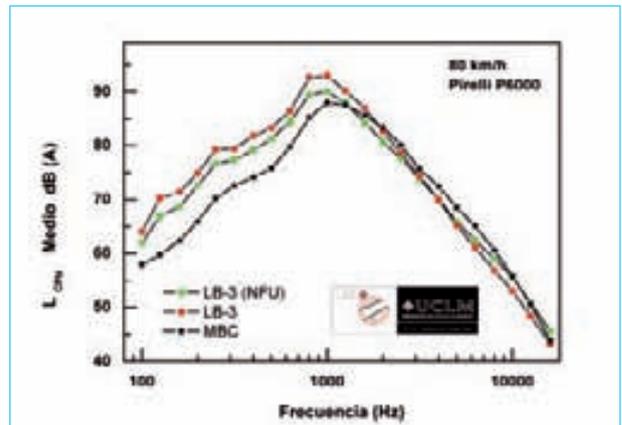


Figura 25. Espectro sonoro de proximidad registrado en la CM-4106.



Figura 26. Testigos extraídos y probetas fabricados para la medida de la absorción sonora de Lechadas Bituminosas.

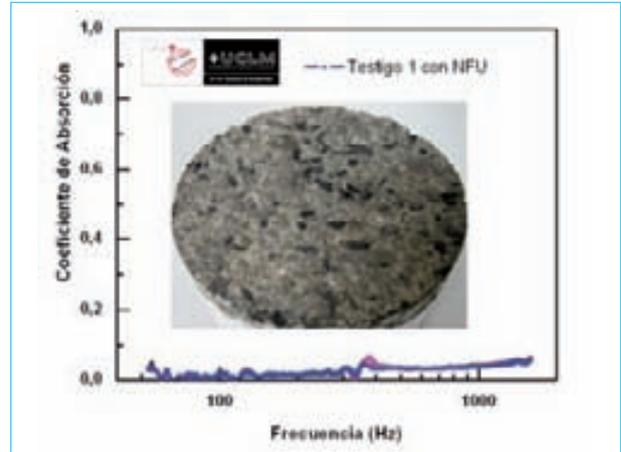
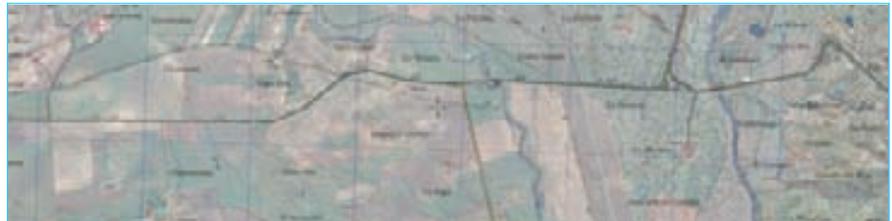


Figura 27. Espectro de absorción sonora de testigo extraído de lechadas con la incorporación de polvo de caucho NFU.

den variar de forma significativa, dependiendo de los tramos estudiados. Así, existen dos tramos de lechadas “antiguas” y “nuevas” con unas diferencias de alrededor de 1 dB(A). Ahora bien, cabe señalar que estudios realizados con el equipo de auscultación georeferenciada TireSonicMk4-LA²IC dan una repetitividad de los resultados sonoros con una desviación estándar inferior a los 0.2 dB (A) para un tramo de ensayo de unos 500 metros de longitud.



La Figura 26 muestra los testigos y probetas fabricadas para el estudio de la absorción sonora de las lechadas bituminosas.

La Figura 27 muestra un espectro de absorción de una lechada bituminosa con la incorporación de polvo de caucho. Como se puede apreciar, la absorción sonora obtenida con tubo de impedancia en incidencia normal es prácticamente nula en el intervalo de frecuencias 50 Hz- 1500 Hz.

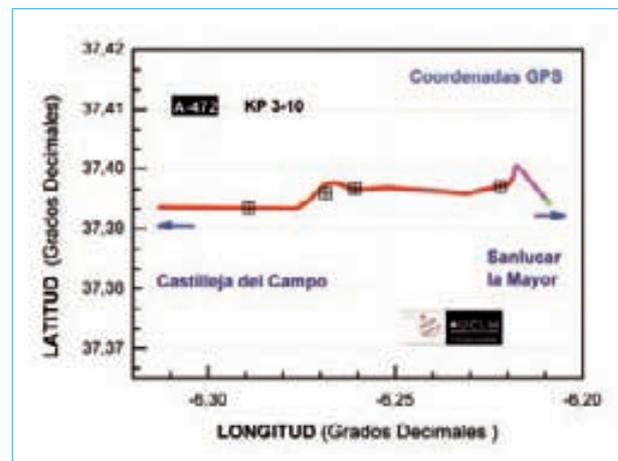


Figura 28. Coordenadas GPS registradas por el equipo de auscultación acústica TiresonicMk4-LA²IC durante las medidas en la A-472 y plano de la zona entre los kilómetros 3 y 9.

El análisis de los espectros sonoros en las lechadas con y sin polvo de caucho indicaría que en las primeras, los mecanismos de generación sonora por impacto y vibraciones de los neumáticos de los vehículos durante la rodadura se han conseguido disminuir apreciablemente. Por otra parte las altas frecuencias no se consiguen disminuir por absorción sonora, aunque podrían reducirse ligeramente por fenómenos de dispersión a altas frecuencias.

Por los resultados obtenidos en esta investigación, la utilización de lechadas con polvo de caucho con la fórmula de trabajo utilizada permitiría incrementar hasta al doble el volumen de tráfico sin verse incrementado el sonido ambiental procedente de la interacción neumático pavimento, si lo comparamos con

una lechada sin la utilización de polvo de caucho. Esto sería válido para velocidades medias por encima de los 40-50 km/h y tráfico fluido, en donde el ruido de rodadura es el dominante.

Estudios en el tiempo de las propiedades superficiales de este tramo experimental han demostrado una disminución en la diferencia de los niveles sonoros entre lechadas bituminosas con y sin la incorporación de polvo de caucho: al cabo de algo más de un año desde su puesta en obra, la diferencia, después de correcciones por temperatura, se quedaría en 1 dB(A).

4. Lechadas bituminosas LB-3 con polvo de caucho en la A-472

En este apartado se presenta el estudio del comportamiento acústico de tramos experimentales fabricados en la Carretera A-472, entre los puntos kilométricos 3 y 13 en la provincia de Sevilla, con lechadas bituminosas tipo LB-3 con la incorporación de polvo de caucho por vía seca, en diferentes cantidades y con diferentes tamaños de partículas de caucho. La Figura 28 muestra las coordenadas del tramo de ensayo registradas durante diferentes auscultaciones así como el plano de la zona.

La Figura 29 muestra un detalle de uno de los tramos experimentales de lechadas LB-3 con polvo de caucho situado en el PK 8+ 000.

Las medidas acústicas fueron realizadas con la cámara semianecoica TiresonicMk4-LA21C (Figura 30) y con dos neumáticos de referencia (Pirelli P6000 y Avon Cooper CR322).

A lo largo de la campaña de auscultación se realizaron diferentes medidas en el mismo tramo de estudio, intentando mantener las mismas condiciones experimentales. Como en anteriores trabajos, con el fin de mostrar la repetitividad de las medidas, definida como precisión bajo condiciones de medida idénticas (si exceptuamos la variación de temperatura) en intervalos de tiempo relativamente cortos, se presenta en la Figura 31 la evolución con la posición de la banda tercio de octava centrada en 1 kHz asociada a 2 pasadas diferentes. El estudio se llevó a cabo con el neumático de referencia Pirelli P6000 a una velocidad de 50 km/h.

Los resultados obtenidos sobre la zona de referencia muestran unas diferencias máximas de niveles sonoros en dB (A) inferiores a 0.2. En el tramo elegido sobre el mismo carril, la velocidad en las diferentes pasadas difiere en alrededor de 0.1 km/h, como se puede apreciar por su precisión en la figura. En esta figura, además, se incluyen las coordenadas GPS en grados decimales, de las trayectorias seguidas por el remolque TiresonicMk4-LA²IC en ambas pasadas en el mismo sentido de auscultación. Como se puede apreciar es muy difícil que la trayectoria en dos pasadas diferentes coincida exactamente, por lo que las diferencias en los perfiles de



Figura 29. Estado de la superficie de un tramo experimental de lechada bituminosa situada en el PK 8 (LB-3 con 20% de ECL-2d-m, 7% polvo caucho NFU 2-4 mm) en el momento de la campaña de medidas.



Figura 30. Equipo de auscultación acústica durante un ensayo en la A-472 en Sevilla.

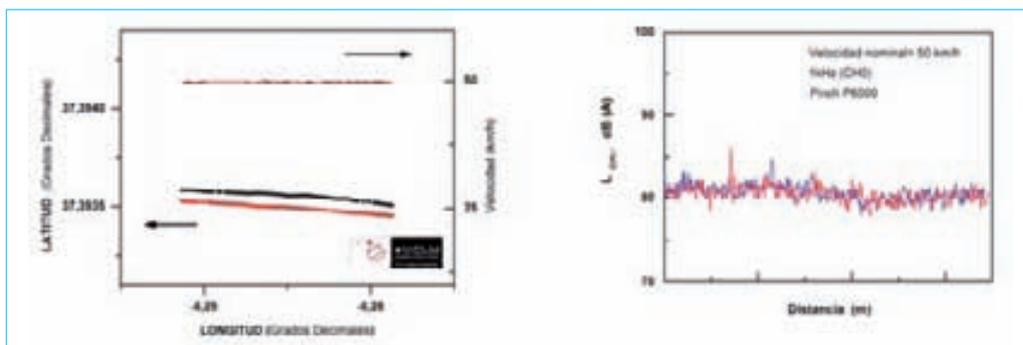


Figura 31. Niveles sonoros (1 kHz) mostrando la repetitividad dentro del mismo tramo de ensayo (ver Figura 5).

los niveles sonoros en diferentes pasadas pueden ser debidas a la trayectoria seguida y a la falta de uniformidad de la capa de rodadura.

Así, en ensayos realizados sobre el mismo tramo, pero en ambos carriles (dos sentidos de marcha), las diferencias entre los niveles medios obtenidos fueron ligeramente superiores, sin sobrepasar los 0.25 dB(A) para el tramo de unos 1100 metros. Este resultado serviría como indicador de la buena puesta en obra/conservación del tramo elegido.



Figura 32. Equipo de auscultación sobre la zona de la LB-3 de referencia.

La Figura 32 muestra el equipo de auscultación acústica en la zona del tramo experimental con la lechada LB-3 de referencia.

En la Figura 33 se muestra el comportamiento acústico de las nuevas lechadas con polvo de caucho. Se ha elegido una pasada continua, para una velocidad de referencia de 80 km/h y sobre un tramo de ensayo entre los kilómetros 7 y 10, aproximadamente. La figura también muestra el resultado de la macrotextura MPD obtenida con el LaserDynamicPG-LA²IC.

La figura muestra la evolución con la posición, PK o distancia, de los niveles sonoros registrados en proximidad con la cámara semianecoica, LCP^{tr} dB(A) a una velocidad de 80 km/h. El neumático elegido para mostrar este resultado es el neumático de referencia Pirelli P6000. Los niveles sonoros son el valor medio de los niveles registrados por dos micrófonos situados en las cercanías del neumático de referencia entre 20 Hz y 16 kHz.

Como se puede observar la homogeneidad longitudinal (desviación estándar de los niveles sonoros) de todas las Lechadas puede considerarse buena, entre 0.8 y 0.5 dB(A).

Los niveles sonoros medios en cada uno de los tramos están entorno a los 95.6, 95.3, 94.5 y 95.4 dB(A) para las lechadas LB-3 con 13 % de ECL-2d-m, LB-3 con 20 % de ECL-2d-m (7 % polvo caucho NFU 2-4 mm), LB-3 con 21 % de ECL-2d-m (10 % polvo caucho NFU 2-4 mm) y LB-3 con 19 % de ECL-2d-m (7 % polvo caucho NFU 2-7 mm, respectivamente).

Las diferencias de niveles sonoros en proximidad entre mezclas pueden llegar a 1 dB(A) entre la LB-3 de referencia y la LB-3 con 10 % de polvo de caucho procedente de NFU (2/4 mm). Valores algo superiores se han obtenido en otros tramos experimentales con lechadas bituminosas tipo LB-3, con y sin polvo de caucho NFU.

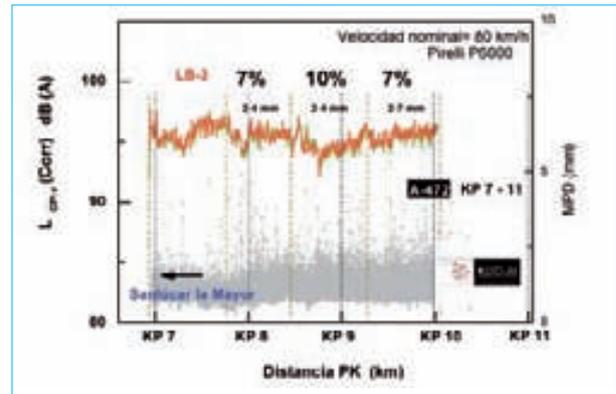


Figura 33. Evolución del nivel de presión sonora en proximidad y MPD en tramos con LB-3: LB-3 con 13 % de ECL-2d-m, LB-3 con 20 % de ECL-2d-m (7 % polvo caucho NFU 2-4 mm), LB-3 con 21 % de ECL-2d-m (10 % polvo caucho NFU 2-4 mm) y LB-3 con 19 % de ECL-2d-m (7 % polvo caucho NFU 2-7 mm)). Medidas sin correcciones por temperatura (42 °C).

La Figura 34 muestra los espectros sonoros medios para cada uno de los tramos analizados y para la mezcla bituminosa de referencia, registrados a 80 km/h con el neumático de referencia Pirelli P6000. Es significativo el descenso que se consigue con las lechadas para frecuencias bajas, entre 500 Hz y 700 Hz, frente a la mezcla convencional. Como era de esperar, la mezcla con 10 % de polvo de caucho posee un espectro ligeramente menos intenso.

5. Mezcla bituminosa tipo BBTM 11A BMAVC en la CM-3102. Alta viscosidad

La incorporación de caucho procedente de los neumáticos fuera de uso (NFU) en las mezclas bituminosas para capas de rodadura permite el diseño de mezclas con alto contenido en ligante. En la carretera situada en la provincia de Ciudad Real CM-3102 se diseñó un tramo experimental con una mezcla en capa de rodadura tipo BBTM 11A con un betún de alta viscosidad; es decir, con la incorporación de un alto porcentaje de polvo de caucho, BMAVC según las especificaciones en España. La Figura 35 muestra un detalle de la planta utilizada para la fabricación de dicha mezcla.

En diferentes trabajos de investigación se ha publicado que una de las consecuencias de la utilización de betunes de alta viscosidad en las mezclas bituminosas es una mayor resistencia a la fatiga, al envejecimiento, a la aparición de reflexión de fisuras de las capas inferiores y todo ello sin riesgo de deformaciones plásticas (roderas). Además, aunque no está acreditado de forma rigurosa, hay algunos informes que asocian a este tipo de mezclas en servicio una reducción del sonido de rodadura. Conviene recordar en este punto que son numerosos los trabajos en donde se comparan este tipo de mezclas con alto contenido de polvo de neumático incorporado por vía húmeda con otras mezclas tipo hormigón con una textura que las hace muy ruidosas.

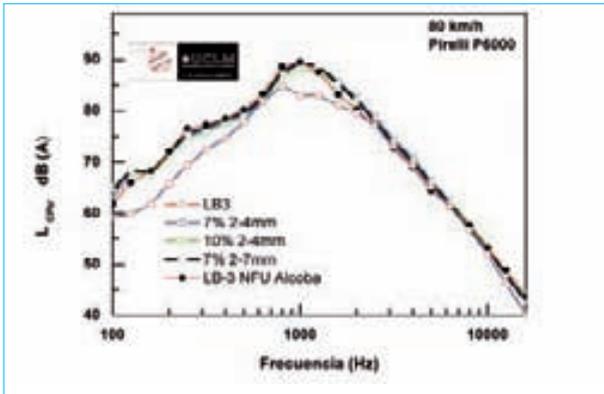


Figura 34. Espectros medios en el tramo de ensayo para las diferentes lechadas estudiadas. En línea azul (R) se incluye el valor medio del espectro sonoro en proximidad para la mezcla de referencia F-10.

El Laboratorio de Acústica Aplicada a la Ingeniería Civil (LA²IC) de la Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM) está realizando estudios para conocer el impacto de la incorporación por vía húmeda del caucho procedente de NFU en alta cantidad (alrededor del 20 % de peso en ligante), en el nivel de emisión sonora generado por la interacción del neumático con la capa de rodadura. Uno de los objetivos de dichos estudios es contribuir a la mejora en el diseño de nuevas mezclas bituminosas sono-reductoras (MBSR) y a mejorar el conocimiento que se tiene sobre los mecanismos de generación del ruido de rodadura. La Figura 36 presenta el aspecto de la superficie de rodadura con la mezcla BBTM 11A con alto contenido en polvo de caucho incorporado por vía húmeda después de su puesta en obra.

Presentamos en este apartado algunos de los resultados y las conclusiones de la geo-auscultación acústica realizada en dichos tramos experimentales de la carretera CM-3102. La caracterización se llevó a cabo con el remolque TiresonicMk4-LA²IC. Además se presentan los resultados de la influencia de la textura superficial en la generación de la emisión sonora. La textura de los tramos de ensayo ha sido registrada con el LaserDynamicPG-LA²IC. También fueron fabricadas diferentes probetas con la mezcla recogida durante el extendido del tramo experimental, utilizando para ello una compactadora Marshall, para la medida de la absorción sonora en incidencia normal.

En el centro del tramo experimental fabricado con una mezcla de granulometría discontinua para capa de rodadura tipo BBTM 11A



Figura 35. Detalle de la planta asfáltica durante la fabricación de la mezcla BBTM 11A con betún de alta viscosidad con caucho, BMAVC, en Ciudad Real.

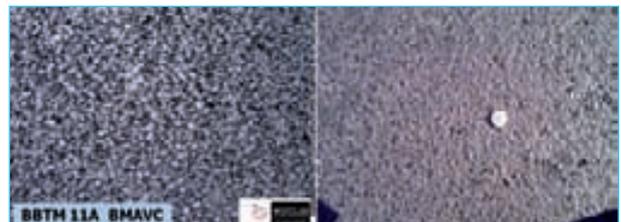


Figura 36. Detalle de la textura superficial de la capa de rodadura recién extendida y al cabo de unos meses.

con betún de alta viscosidad BMAVC de varios kilómetros de longitud, se construyó un subtramo de referencia, de unos 100 m de longitud, fabricado con el mismo tipo de mezcla discontinua BBTM 11A B50/70, pero sin la incorporación de polvo de caucho. La Figura 37 muestra los niveles sonoros de proximidad registrados antes de la rehabilitación de la capa de rodadura (mezcla AC16 surf S). Como se puede apreciar, para la velocidad de referencia de 50 km/h, los valores medios superan los 90 dB (A).

En la misma figura se presentan los resultados de la macrotextura obtenida del perfil de la carretera durante la campaña de auscultación. Los valores obtenidos para la capa de rodadura AC16 surf S son relativamente bajos: alrededor de 0.7 mm. Después de la rehabilitación de la capa de rodadura se observó, para el tramo experimental, una reducción apreciable de los niveles sonoros de roda-

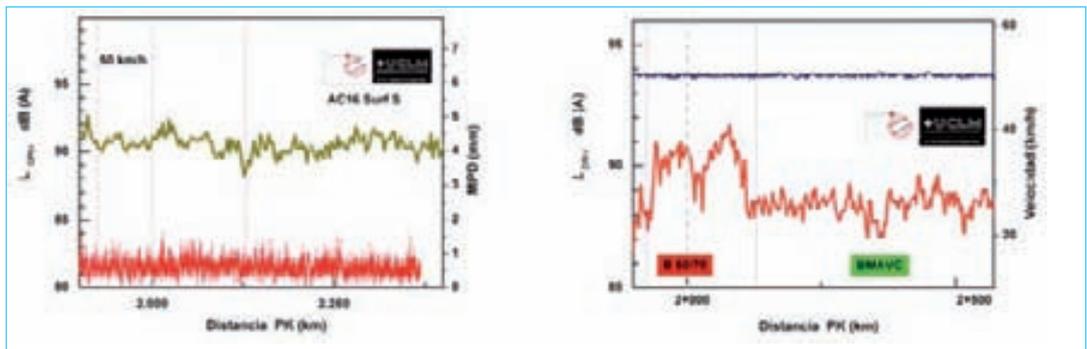


Figura 37. Niveles sonoros de proximidad antes y después de la rehabilitación del tramo experimental. Niveles de macrotextura antes de la rehabilitación.



Figura 38. Láser montado en un vehículo del LA²IC durante el registro del perfil de la carretera.

dura. En la figura se observa los resultados de la auscultación acústica de una zona cercana al tramo de referencia, en donde se puede apreciar valores de alrededor de los 89 dB(A) para la mezcla experimental y algo superiores para la mezcla sin polvo de caucho (mezcla de referencia). La Figura 38 muestra el LaserDynamicPG-LA2IC durante un registro del perfil de la carretera para posteriormente calcular la macrotextura (MPD) de la capa de rodadura.

La Figura 39 muestra la evolución en función de la velocidad de los niveles sonoros de proximidad para la frecuencia de 1 k Hz registrado en la mezcla experimental. Como se puede apreciar, la pendiente del ajuste de dichos datos es cercana a B=35. Este resultado es comparable con otros obtenidos en otras mezclas en servicio [1-5].

Este estudio muestra que la adición de polvo de caucho por vía húmeda, si se hace en altas concentraciones, reduce la emisión sonora de forma apreciable respecto a la registrada en el mismo tipo de mezcla, pero fabricada con betún convencional. En el diseño de la mezcla se ha tenido especial cuidado en que el tramo experimental, y el de referencia, presentarán valores medios de macrotextura y contenido en hueco similares, para así estudiar la influencia de la incorporación por vía húmeda del polvo de caucho en alto contenido al betún.

La Figura 40 muestra un detalle de los equipos utilizados para la medida de la absorción sonora de la mezcla BBTM 11A con y sin la adición de polvo de caucho NFU.

Conviene subrayar que las medidas experimentales sobre la capa de rodadura rehabilitada se llevaron a cabo unos 3 meses después de la puesta en obra.

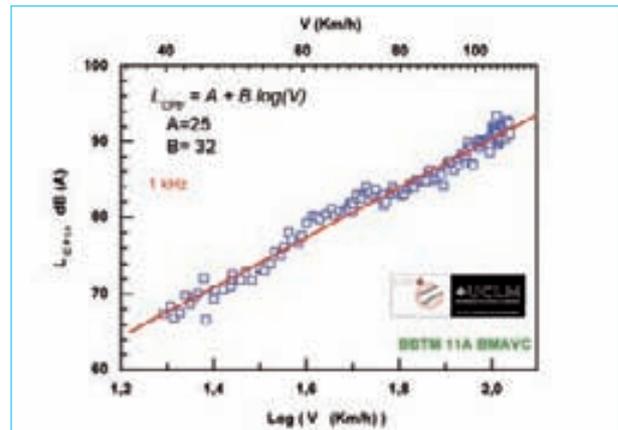


Figura 39. Dependencia con la velocidad de los niveles sonoros de proximidad LCPtr para la frecuencia de 1 kHz para la mezcla en servicio con betún de alta viscosidad.



Figura 40. Trabajos de compactación de la mezcla BBTM 11A BMAVC y de medida de la absorción sonora en tubo de impedancia.



Figura 41. Eco-Etiqueta de acreditación de la capacidad sono-reductora para la Mezcla Bituminosa Sono-Reductora BBTM 11A BMAVC extendida en la CM-3102, como Clase A, para una velocidad de 80 km/h, acreditado por el LA²IC.

Los análisis de las medidas muestran algo más de 2 dB(A) de diferencia entre el nivel sonoro medido en proximidad (LCPtr) debido a la mezcla con betún BMAVC y el nivel sonoro registrado sobre la mezcla fabricada con betún convencional B50/70. La adición de polvo de caucho procedente de NFU por vía húmeda en altas cantidades parece producir, en una etapa inicial, una clara disminución de los niveles sonoros debidos a la interacción entre neumático y pavimento ^{(x), (xi)}. Asimismo, el nivel sonoro

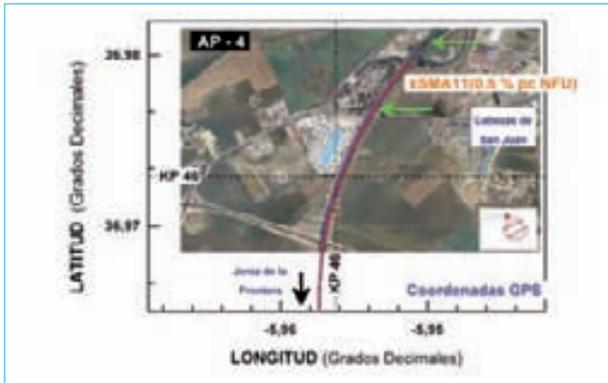


Figura 42. Coordenadas GPS durante los ensayos realizados en el carril rápido (puntos azules) a 110 km/h y en el carril lento (puntos rojos) a la velocidad de referencia de 80 km/h.

LCPtr asociado a la nueva capa de rodadura tipo BBTM 11A con BMAVC, es más de 3 dB(A) menor que el nivel registrado en el pavimento existente antes de la rehabilitación. Atendiendo a la certificación acústica de mezclas propuesta por el LA²IC (ver anexo) la mezcla bituminosa tipo BBTM 11A BMAVC elaborada con betún de alta viscosidad con polvo de caucho NFU, sería una Mezcla Bituminosa Sono-Reductora Clase A para la velocidad de 80 km/h, en el momento de la certificación; es decir, a los 3 meses desde su puesta en servicio (Figura 41).

Para poder confirmar las características sono-reductoras reflejadas por la mezcla bituminosa ensayada BBTM-11A con betún BMAVC, es necesario realizar nuevas medidas para evaluar si este comportamiento se mantiene a lo largo del tiempo en la misma proporción. En este caso, tanto el tramo experimental como el subtramo de referencia están soportando las mismas condiciones meteorológicas y número y tipo de tráfico rodado.

6. Mezclas tipo xSMA11 con polvo de caucho en la AP-4

Las mezclas Stone Mastic Asphalt (SMA) son mezclas bituminosas discontinuas que se desarrollaron en Alemania en la década de los 60 y que se utilizan como capas de rodadura. En Estados Unidos se empiezan a utilizar en los años 90, incrementándose su uso desde entonces. Están formadas por un esqueleto de árido grueso (70-80 %) fuertemente cohesionado debido a una mezcla de filler en relativa alta proporción y a una gran cantidad de betún que envuelve los áridos con una película de elevado espesor. El contenido de huecos en mezcla es bajo, comprendido entre el 1.5 % y el 8 %. El diseño de las mezclas SMA es crítica pues hay que generar una discontinuidad en la granulometría que permita aceptar la gran cantidad de betún (entre el 5-8 %) que contribuirá a proporcionar una gran durabilidad a la mezcla. Las segregaciones de betún se consiguen evitar gracias a las fibras estabilizadoras utilizadas y/o a otro tipo de aditivos. Los trabajos de la literatura han venido confirmando que el contacto de los áridos gruesos y la gran cantidad de ligante



Figura 43. TireSonicMk4-LA2IC durante la auscultación acústica de la AP-4 a los 2 meses de la puesta en obra del tramo experimental con mezcla tipo xSMA11 35/50 con NFU.

de este tipo de mezclas, asegura una matriz muy duradera con gran capacidad para resistir deformaciones permanentes. Además, las mezclas tipo SMA convencionales pueden presentar una elevada rugosidad, lo que produce unas propiedades aceptables de resistencia al deslizamiento, fundamentalmente después de que una película fina de betún ha sido eliminada de la capa más superficial del pavimento, debido al tráfico.

En este apartado se presentan los resultados del estudio de la caracterización acústica de mezclas tipo xSMA11 35/50 con la adición de polvo de caucho procedente de neumáticos fuera de uso (NFU) en una proporción del 0.5 % sobre mezcla, introducido por vía seca. La cantidad de huecos en mezcla está en el 11 %. La cantidad de betún sobre árido en estas mezclas experimentales está en el 6 %. La citada mezcla fue extendida en un tramo experimental en la AP-4, entre los puntos kilométricos 46+200 y 45+600, en sentido Sevilla. La Figura 42 muestra las coordenadas de posicionamiento global registradas durante la campaña de auscultación acústica, tanto del carril rápido como del carril lento, del tramo de ensayo fabricado con la citada mezcla xSMA11. Además, con el fin de tener caracterizada la mezcla se ha llevado a cabo en laboratorio el estudio de la absorción acústica de probetas Marshall, cuya mezcla fue recogida en la planta de fabricación previo a los trabajos de extendido.

Unos dos meses después de ser extendida la mezcla, se llevó a cabo la auscultación acústica del tramo experi-

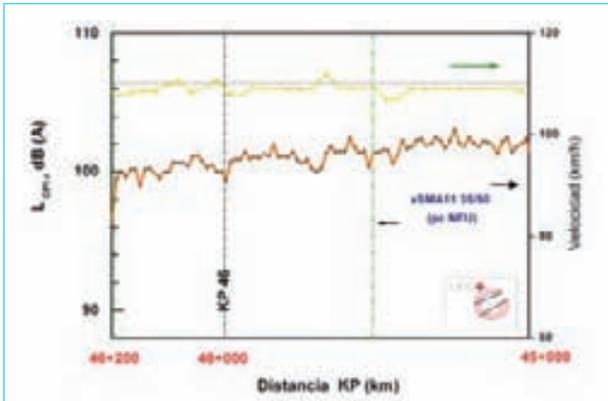


Figura 44. Niveles sonoros de proximidad registrados con el neumático Pirelli P6000 a velocidad nominal de 110 km/h.

mental y de otros tramos de la AP-4, considerados como de referencia. La Figura 43 muestra un detalle del vehículo de auscultación tanto en el peaje de Cabezas de San Juan como en Jerez de la Frontera.

La Figura 44 muestra los niveles sonoros de proximidad durante una auscultación del carril rápido de la autopista. Los resultados del nivel global del ruido de proximidad (LCPtr dB(A)) para la capa de rodadura a velocidad de referencia de 110 km/h tienen un valor aproximado de 102 dB(A).

La Figura 45 muestra los espectros sonoros en 1/3 - octava, valores medios asociados a unos 200 m de longitud elegidos dentro de cada tramo de ensayo, registrados a las velocidades de 80 km/h y 110 km/h. Los niveles sonoros presentados en esta figura no están corregidos por velocidad ni han sido normalizados a la temperatura de referencia de 20 ° C. También fue registrado la evolución del nivel sonoro con la velocidad (Figura 46), obteniéndose un valor para la pendiente B= 44 dB(A). Este valor es relativamente alto, lo que hará de la mezcla en servicio una mezcla poco sono-reductora a altas velocidades.

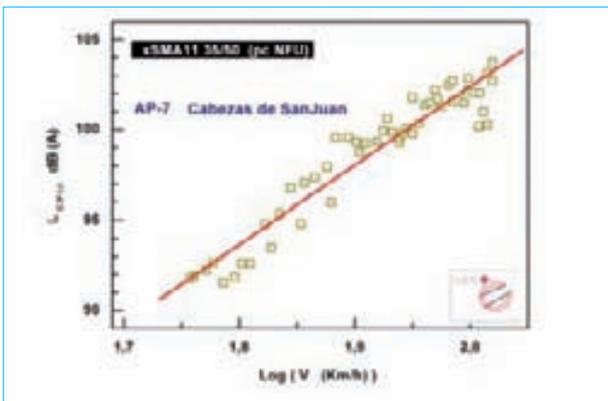


Figura 46. Dependencia con la velocidad de los niveles sonoros de proximidad LCPtr para la frecuencia de 1 kHz para la mezcla en servicio xSMA11 35/50 con 0.5 % de polvo de caucho NFU.

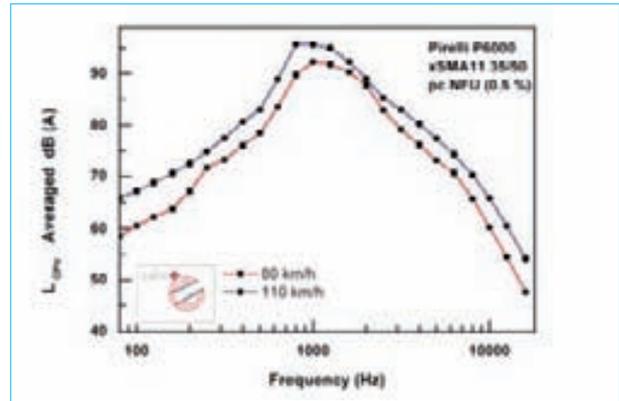


Figura 45. Espectros de proximidad registrados a diferentes velocidades en la mezcla xSMA11 (NFU).

Los resultados del comportamiento sonoro de las nuevas mezclas xSMA11 35/50 (pc NFU al 0.5 %) han sido comparados con los obtenidos durante la misma campaña de auscultación en las cercanías del Aeropuerto de Jerez de la Frontera, entorno al PK 70+000 de la AP-4. Los resultados de los niveles globales de estas mezclas xSMA con polvo de caucho son alrededor de 3 dB(A) menores que los obtenidos en este tramo de referencia. Conviene resaltar que la mezcla de referencia es un hormigón con una textura que lo hace especialmente poco silencioso.

Para finalizar señalaremos que la absorción sonora de las probetas fabricadas con la mezcla del extendido, a pesar del alto contenido en huecos en estas mezclas (11 % sobre mezcla), está por debajo de 0.3 en todas las frecuencias desde 50 Hz hasta 1600 Hz. Esta absorción resulta insuficiente para mejorar, por este mecanismo, el ruido de rodadura de esta mezcla.

7. Mezclas tipo xSMA8 con polvo de caucho en un tramo urbano

En esta sección se presentan algunos de los resultados del estudio de la caracterización acústica de mezclas tipo xSMA8 50/70 con la adición de polvo de caucho

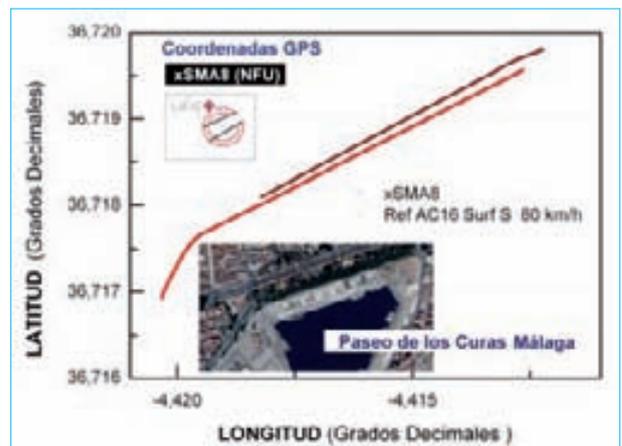


Figura 47. Coordenadas GPS registradas con el TireSonicMk4-LA²IC durante la auscultación acústica del tramo de ensayo.



Figura 48. Zona de ensayo y superficie de la mezcla durante la auscultación acústica.



procedente de neumáticos fuera de uso (NFU) introducido por vía seca (0.5 % del total de la mezcla).

Uno de los propósitos de este trabajo fue la caracterización acústica de nuevas mezclas tipo xSMA (con un tamaño máximo de árido de 8 mm y con la adición de polvo de caucho procedente de NFU) desarrolladas para su empleo en España.

El tramo de ensayo evaluado está fabricado con la mezcla bituminosa denominada xSMA8 en la ciudad de Málaga; un tramo de ensayo de unos 500 m de longitud cuyas coordenadas de posicionamiento global GPS registradas con los equipos de medida durante la campaña de auscultación se presentan en la Figura 47. Insertada en la figura se muestra una fotografía aérea del tramo de ensayo. En color más oscuro se muestra también uno de los tramos de referencia utilizados, paralelo al carril fabricado con la mezcla experimental.

La Figura 48 muestra un detalle tanto del tramo experimental urbano como de la mezcla a los 5 meses de su puesta en obra.

Los niveles del ruido de proximidad LCPtr dB(A) durante la interacción del neumático de referencia y la capa de

rodadura con mezcla xSMA8 50/70 fueron analizados en bandas 1/3-octava entre 200 Hz y 10 kHz. Las velocidades de referencia seleccionadas para la auscultación acústica de las mezclas extendidas en el tramo experimental, al tratarse de un tramo urbano, fueron 50 km/h y 80 km/h. Además, se han realizado estudios del comportamiento acústico de la mezcla xSMA8 50/70 con la velocidad: se han realizado diferentes ensayos sobre los tramos experimentales variando continuamente ésta y registrando de forma sincronizada las coordenadas GPS, los niveles LCPtr dB(A) y la velocidad.

Para completar la caracterización de la mezcla, se realizó la medida de la absorción sonora en tubo de impedancia de probetas elaboradas con la mezcla recogida durante el extendido de la capa de rodadura. La Figura 49 muestra el equipo que permite de forma simultánea y geo-referenciada la auscultación acústica y de medida del perfil de la vía.

El espectro de absorción para incidencia normal muestra unos valores inferiores a 0.2 en todo el intervalo de frecuencias estudiadas para este tipo de mezclas. El contenido de huecos en mezcla en estas probetas está entorno al 5 %. Estos resultados nos indican que este tipo de mezclas xSMA8, por su bajo contenido en hue-



Figura 49. TireSonicMk4-LA²IC durante la auscultación acústica del tramo experimental con la mezcla xSMA8 con polvo de caucho procedente de NFU, a los 5 meses de la puesta en servicio.

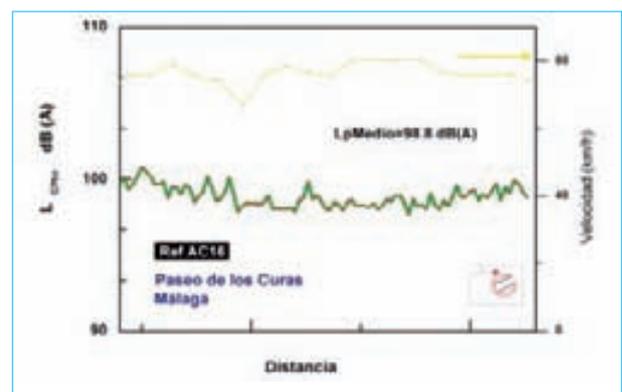


Figura 50. Evolución de los niveles sonoros en proximidad de la mezcla de referencia AC16 surf S.



Figura 51. Eco-etiqueta de acreditación acústica Clase A como MBSR a 80 km/h para la mezcla evaluada.

cos, no van a reducir el ruido de rodadura generado por los vehículos en la interacción neumático/mezcla bituminosa, debido a la absorción sonora.

La Figura 50 muestra la evolución de los niveles sonoros LCPtr dB(A) a lo largo de uno de los tramos de referencia (AC16 surf S deteriorada) a una velocidad nominal, ver figura, de 80 km/h. El valor medio en el tramo de ensayo está en unos 99 dB(A) para el neumático de referencia utilizado.

El valor medio de los niveles sonoros para el carril rápido a la velocidad de 80 km/h de la mezcla xSMA8 50/70 con polvo de caucho procedente de NFU es de unos 92.5 dB(A). Este valor del nivel sonoro global de proximidad permitiría clasificar acústicamente la mezcla extendida como Mezcla Bituminosa Sono-Reductora (MBSR) Clase A para la velocidad de 80 km/h (Ver por ejemplo: Jornada Técnica sobre MBSR: I+D+i) (Figura 51).

La Figura 52 muestra el comportamiento acústico de la mezcla tipo xSMA8 50/70 (0.5 % polvo de caucho NFU introducido por vía seca) frente a la velocidad. El ajuste lineal de los datos experimentales se realiza con una pendiente $B=28$. Este valor asegura para la mezcla un buen comportamiento a velocidades medias y altas.

Los valores medios de los niveles sonoros de proximidad registrados, para la velocidad de referencia de 50 km/h, que están más de 6 dB(A) por debajo de los valores registrados para los tramos de referencia, registrados en las mismas condiciones de temperatura, condiciones del neumático de referencia, velocidad, etc.

Este resultado del nivel global medio asociado a la mezcla podría catalogarse como MBSR Clase C para la velocidad de 50 km/h.

En la Figura 53 se presentan los espectros de los niveles sonoros de proximidad en bandas 1/3 – octava, entre las bandas de 100 Hz y 10 kHz, registrado a 80 km/h. La gráfica presenta el valor medio a lo largo del tramo de ensayo fabricado con la mezcla xSMA8 50/70 (0.5 % pc NFU).

Como se puede apreciar en la figura, los niveles asociados al impacto y vibraciones (frecuencias ligeramente por debajo de 1 kHz) son similares o ligeramente inferiores en la mezcla xSMA8 50/70 que en la mezcla de referencia AC16 surf S. A mayores frecuencias, en donde dominarían los fenómenos de generación del sonido denominados aerodinámicos, obtenemos una clara menor contribución al ruido de rodadura de la mezcla experimental, si la comparamos con la de referencia, como se puede apreciar en la figura.

La absorción sonora de las probetas fabricadas por el método Marshall, con la mezcla experimental xSMA8 50/70 con incorporación de un 0.5% de polvo de caucho por vía seca, muestra un coeficiente de absorción inferior a 0.2 en todo el intervalo de frecuencias estudiadas. Por otra parte, los niveles sonoros de proximidad LCPtr registrados con cámara semianecoica en el tramo experimental muestran un comportamiento Sono-Reductor de la mezcla extendida a los 5 meses de su puesta en obra. La mezcla podría catalogarse como mezcla bituminosas sono-reductora (MBSR) Clase A para la velocidad de 80 km/h y de Clase C para la velocidad de 50 km/h.

Para comprender el comportamiento acústico descrito de la mezcla xSMA8 puesta en servicio con incorporación de polvo de caucho por vía seca, es necesario una correlación de los niveles sonoros geo-referenciados con la textura de la capa de rodadura, además de los datos de la rigidez dinámica (impedancia mecánica) de la mezcla puesta en servicio. Este trabajo de investigación está siendo llevado a cabo por el LA²IC en el marco de un proyecto de investigación del Plan Nacional de I+D+i. De los resultados preliminares obtenidos, se deduce que el excelente comportamiento sono-reductor de la mezcla xSMA8 50/70 con 0.5 % de polvo de caucho incorporado por vía seca (MBSR Clase A80km/h) no se puede achacar a la incorporación del polvo de caucho por vía seca en estas cantidades (0.5 % sobre mezcla), y sí a la textura conseguida en la mezcla en servicio y/o a la fabricación de la mezcla y su puesta en obra.

CONCLUSIONES

Numerosos son los trabajos en los que, en general, se concluye que el polvo de caucho utilizado en mezclas bituminosas permite reducir el agrietamiento, mejora la durabilidad y contribuye a mitigar el ruido generado. Por lo que hace referencia al ruido generado, muchos de los trabajos utilizan como pavimento de referencia un pavimento de hormigón para estimar la reducción sonora conseguida. Por lo general, los pavimentos de hormigón,

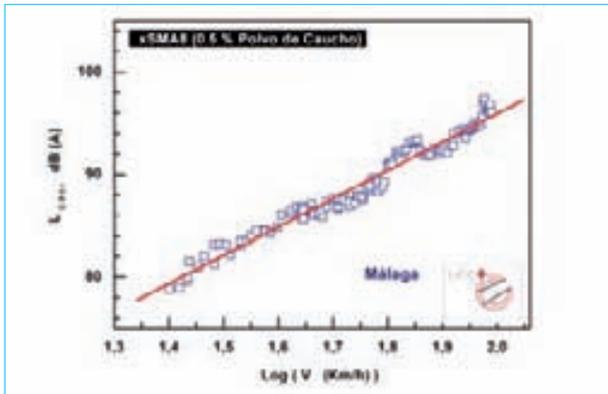


Figura 52. Evaluación del nivel sonoro global de proximidad frente a la velocidad para la capa de rodadura extendida con mezclas xSMA8 50/70 (0.5 % pc NFU).

debido generalmente a su textura superficial, resultan extremadamente sonoras y por tanto, casi cualquier pavimento será sono-reductor comparado con ellos, incluso los fabricados con mezclas convencionales SMA. ¿Realmente hay alguna investigación rigurosa sobre el efecto de incorporar polvo de caucho a la mezcla asfáltica sobre la reducción de ruido generado por la mezcla?; es decir, comparar tramos a escala real, puestos en obra en las mismas condiciones, soportando las mismas condiciones ambientales y de tráfico, y siendo los mismos tipos de mezclas bituminosas las comparadas (mismo tipo de áridos, tamaños máximos de áridos y ligante base), con y sin polvo de caucho proveniente de neumáticos fuera de uso.

Cuando evaluamos el comportamiento de mezclas bituminosas en servicio que contienen polvo de caucho proveniente de neumáticos fuera de uso, diferentes variables necesitan ser tenidas en cuenta, aunque dependerá del uso del pavimento. Entre los factores a considerar están las propiedades del ligante cuando se incorpora el polvo de caucho por vía húmeda, y las propiedades de la mezcla cuando la incorporación se realiza por la denominada vía seca. La rentabilidad económica de ambos procesos, debida al incremento de costes por utilización de mayor dotación de ligante o procesado de materiales de desecho, vendrá de asegurar una mayor vida acústica útil de los pavimentos con polvo de caucho proveniente de neumáticos fuera de uso.

Hasta la fecha, el LA²IC ha llevado a cabo investigaciones tanto de mezclas en laboratorio como de mezclas en tramos a escala real enfocados tanto a tramos vía seca como a tramos vía húmeda. A pesar de ello, el número de tramos es limitado para llegar a resultados concluyentes sobre el efecto de incorporar polvo de caucho a las mezclas bituminosas sobre el ruido generado. La dificultad de realizar medidas acústicas rigurosas a lo largo

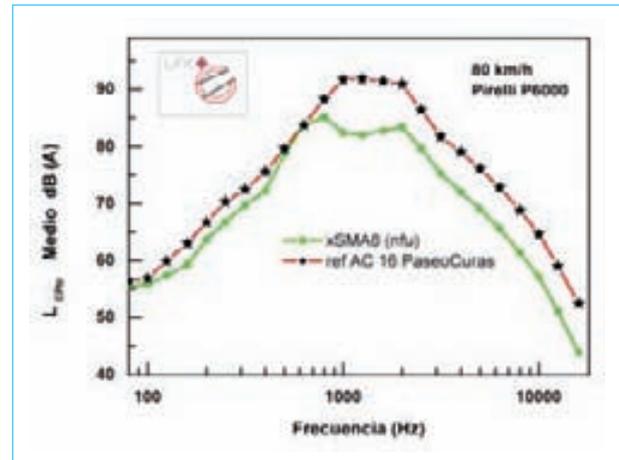


Figura 53. Espectros medios del nivel sonoro de proximidad para la mezcla xSMA8 para la velocidad de referencia de 80 km/h.

del tiempo sobre la totalidad de un tramo a escala real hace que no existan investigaciones concluyentes hasta la fecha sobre cómo evoluciona en el tiempo (3-4 años) una mezcla con polvo de caucho en servicio, frente a la misma mezcla sin polvo de caucho.

Por otra parte, a pesar de las citas y afirmaciones encontradas en la literatura técnica y científica, no hay un trabajo concluyente de investigación en donde la menor rigidez del pavimento en servicio sea consecuencia directa de la capacidad sono-reductora de las mezclas con incorporación de polvo de caucho NFU. Después de la experiencia acumulada en el estudio de tramos experimentales no parece que la incorporación del polvo de caucho en la mezcla bituminosa sea causa directa de la menor generación sonora en la mayoría de las mezclas estudiadas. Como se ha comprobado en algunos trabajos de investigación, es un conjunto de aspectos los que hay que tener presentes para explicar el comportamiento acústico de una mezcla en servicio: la textura obtenida, el contenido en huecos en la zona más superficial del pavimento, la rugosidad de la capa de rodadura, la rigidez dinámica de la mezcla en servicio, y sobre todo, el diseño, fabricación de la mezcla y su puesta en obra, aspectos estos últimos que no son, muy frecuentemente, tenidos en cuenta.

De los tramos experimentales estudiados hasta la fecha, el tramo fabricado con alto contenido en ligante y con la adición de polvo de neumático en alta proporción (20 % de peso en ligante) por vía húmeda, es uno de los que mejores resultado ha mostrado en la reducción sonora comparado con el mismo tipo de mezcla sin polvo de caucho. Esta reducción sonora que ha llegado a 2.5 dB(A) en una primera etapa podría ser atribuida a la alta cantidad de ligante y de polvo de caucho que incorpora la mezcla.

AGRADECIMIENTOS

Este artículo de revisión sobre la evaluación acústica de mezclas bituminosas con polvo de caucho procedente de neumáticos fuera de uso (NFU) ha sido parcialmente patrocinado por el Ministerio de Economía y Competitividad-MINECO junto con fondos FEDER, a través del Proyecto del Plan Nacional de I+D+i, BIA2012-32177.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- I. S. E. Paje, M. Bueno, F. Terán and U. Viñuela. Monitoring road surfaces by close proximity noise of the tire/road interaction. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2007; 122 (5): 2636-2641.
- II. S. E. Paje, F. Terán, U. Viñuela, S. Lopéz, A. Sanz, R. Crespo del Río, F. J. Saura, F. Cendrero y R. Martín-Serrano. Evaluación acústica de la superficie de rodadura para su gestión y rehabilitación. VII Congreso Nacional de Firmes. Avila, 2006.
- III. S. E. Paje, M. Bueno, F. Terán, R. Miró, F. Pérez-Jiménez, A.H. Martínez. Acoustic field evaluation of asphalt mixtures with crumb rubber. *Applied Acoustics* 2010; 71: 578-82.
- IV. S.E. Paje, M. Bueno, U. Viñuela, F. Terán. Toward the acoustical characterization of asphalt pavements: analysis of the tire/road sound from a porous surface. *Journal of the Acoustical Society of America* 2009; 125(1): 5-7.
- V. S. E. Paje, M. Bueno, F. Terán y U. Viñuela. Evaluación del comportamiento acústico de la superficie de la carretera: TiresonicMk4-LA2IC. VII Encuentro Nacional de la Carretera. Semana de la Carretera, Valencia, 2008.
- VI. Informe Proyecto SMA, SMA/I Medidas Tramo Experimental ICV- 43/UCLM(LA2IC)/ O4/2011/Rev-0. Evaluación acústica de mezclas SMA 16 BM3c y SMA 11 BM3c en un tramo de ensayo de la CV-43. 2011.
- VII. Informe Proyecto SMA, xSMA11/Ruido Tramo Experimental AP4/UCLM(LA2IC)/ 2012/ Rev-0. Caracterización acústica de tramos de ensayo con mezclas xSMA11, con fibra y con caucho NFU (alto % en huecos). 2012
- VIII. S. E. Paje, M. Bueno, F. Terán, U. Viñuela, J. Luong. Assessment of asphalt concrete acoustic performance in urban streets. *Journal of the Acoustical Society of America* 2008; 123(3): 1439 -45.
- IX. M. Bueno, J. Luong, F. Terán, U. Viñuela and S. E. Paje. Macrotexture influence on vibrational mechanisms of the tyre-road noise of an asphalt rubber pavement. *International Journal of Pavement Engineering*, 2013.
- X. Informe Proyecto SMA, SMA/I Medidas Tramo Experimental CV- 43/UCLM(LA2IC)/ O4/2011/Rev-0. Evaluación acústica de mezclas SMA 16 BM3c y SMA 11 BM3c en un tramo de ensayo de la CV-43. 2011.
- XI. S. E. Paje, et al. Road pavement rehabilitation using a binder with a high content of crumb rubber: Influence on noise reduction. *Construction and Building Materials*, 2013; 47: 789-798.
- XII. J. Luong, Evaluación de la Superficie de Mezclas Asfálticas: Textura y Absorción Acústica relacionadas con el Ruido de Rodadura, PhD thesis, LA2IC, ETSI de Caminos, Canales y Puertos de Ciudad Real – Universidad de Castilla-La Mancha (Spain), (2012).
- XIII. M. Bueno, Caracterización Acústica de Mezclas Asfálticas para Atenuar la Contaminación Sonora, PhD thesis, LA2IC, ETSI de Caminos, Canales y Puertos de Ciudad Real – Universidad de Castilla-La Mancha (Spain), (2010)
- XIV. S. E. Paje et al. Innovación para el control del ruido ambiental. Universidad de Castilla-La Mancha, 2013.

ANEXO

1. Propuesta de método de certificación acústica de pavimentos en servicio basada en una metodología LA²IC

En la actualidad en Europa se viene echando en falta un sistema para acreditar que una mezcla posee capacidad para emitir menos sonido (Mezcla Sono-Reductora: MBSR); sistema que debería ser aceptado tanto por los propietarios de las vías como por los fabricantes y empresas consultoras.

Un sistema de estas características permitiría un etiquetado medioambiental de mezclas bituminosas en servicio, valorando su capacidad sono-reductora, y las dotaría de un valor añadido. Además, contribuiría a incrementar la mejora y el desarrollo de nuevas mezclas bituminosas, junto a su mayor utilización por parte de las diferentes administraciones.

El Laboratorio de Acústica Aplicada a la Ingeniería Civil (LA²IC) viene utilizando un procedimiento para la evaluación de una mezcla como mezcla bituminosa sono-

reductora. Para ello se utilizan los denominados Tramos de Prueba o Tramos Experimentales, en donde se analizarán las características de la capa de rodadura utilizando, fundamentalmente, la metodología CPX (medida del ruido de proximidad). El posterior etiquetado sonoreductor de las mezclas en servicio se plasmará en una clasificación en tres clases: MBSR Clase A, MBSR Clase B y MBSR Clase C. Las capas de rodadura con mezclas Clase A mostrarán la mayor capacidad sonoreductora, y las Clase B y C, una capacidad sonoreductora algo menor, comparándolas con las de una capa de rodadura de un hormigón bituminoso AC 16 surf S de unos 8 años. Este sistema de certificación acústica va acompañado de valores de referencia de las emisiones de ruido de proximidad, tanto a 50 km/h como a 80 km/h.

INTRODUCCIÓN

En la mayoría de los países Europeos la utilización de pavimentos de baja emisión sonora se venía centrando en tramos de ensayo experimentales. En la actualidad, cada vez más, se está poniendo especial atención en que la rehabilitación de pavimentos en aglomeraciones se realice con materiales con bajas emisiones sonoras para el tráfico rodado; es decir, pavimentos que tengan contrastada su capacidad Sono-Reductora.

En países como Dinamarca, Holanda, Reino Unido, Francia, Portugal y España, se viene intentando establecer procedimientos para una certificación de pavimentos con baja emisión sonora, utilizando para ello tramos de prueba para realizar los ensayos acústicos y de la superficie de la vía.

En este anexo se va a describir una metodología para certificar la capacidad reductora del sonido de los pavimentos tradicionales y de nuevas mezclas, y establecer un criterio para un posible Etiquetado Medioambiental Sono-Reductor de dichos pavimentos. Para ello se hará una descripción del método de medida, y se fijarán los valores de referencia y el modelo de acreditación^{LA2IC} acústica de MBSR. Este sistema de acreditación contiene tres Clases de etiquetado de la capa de rodadura:

- **MBSR Clase A**, con reducciones sonoras **excelentes**
- **MBSR Clase B**, con **buenas** reducciones sonoras
- **MBSR Clase C**, con **aceptables** reducciones sonoras.



Figura A1. Remolque TiresonicMk4-LA^{2IC} durante un ensayo para la caracterización acústica de una mezcla bituminosa en servicio.

Normalmente, las mezclas evaluadas tienen etiquetado acústico Clase B o C. Sólo en casos excepcionales se ha encontrado pavimentos Clase A.

Los niveles sonoros de referencia utilizados en este sistema de acreditación se refieren a niveles CPX (niveles sonoros de interacción neumático pavimento medidos en proximidad: L_{CPTr} , dB(A)). El sistema de acreditación ha de incluir una descripción de la sección de ensayo en donde se ha extendido la mezcla, las características de la mezcla, los resultados de las medidas CPX, Clase de MBSR, macrotextura media, absorción sonora de la mezcla extendida, rigidez dinámica de la capa de rodadura, etc.

MÉTODO DE ACREDITACIÓN^{LA2IC} DE MBSR

1. Principios

Para ser capaz de certificar la capacidad de reducción sonora de una mezcla bituminosa en servicio, en primer lugar, es necesario establecer unos valores de referencia para los niveles sonoros emitidos. Estos valores han de poder ser medidos con un método experimental previamente establecido, para una caracterización rápida y en casi cualquier circunstancia.

El ruido por tráfico rodado representa gran parte del ruido que soporta la población en las aglomeraciones. Dentro del tráfico viario, el ruido asociado a la rodadura (interacción neumático/pavimento) domina a velocidades por encima de los 40 km/h. Este ruido de rodadura puede ser registrado, por ejemplo, por un método estadístico, conocido como SPB, o por el denominado método CPX (caracterización acústica en proximidad de la mezcla en servicio, ver Figura A1).

El método SPB mide la emisión sonora en un punto fijo del tramo de ensayo, a unas alturas definidas y a una

distancia determinada de la vía. En este método se registran la velocidad de los vehículos que circulan, utilizando normalmente un radar, el tipo de vehículo y los niveles sonoros registrados por cada uno de estos vehículos. Todos estos valores se usan para calcular la contribución individual de cada tipo de vehículo utilizado durante la medida al nivel SPB combinado.

Para calcular el indicador ISPB (Statistical Pass By Index) se utilizan las siguientes categorías de vehículos sobre la zona de ensayo:

- Categoría 1. Vehículos de pasajeros
- Categoría 2a. Vehículos pesados de dos ejes con más de cuatro ruedas
- Categoría 2b. Vehículos pesados de más de dos ejes

El número de vehículos recomendados para la medida de cada categoría es de 100, 50 y 50, respectivamente. Una vez registrados los niveles sonoros y los valores de la velocidad de cada uno de los vehículos se calcula el indicador según la fórmula

$$ISPB = 10 \cdot \log \left[W_1 \cdot 10^{0.1L_1} + W_{2a} \left(\frac{v_1}{v_{2a}} \right) 10^{0.1L_{2a}} + W_{2b} \left(\frac{v_1}{v_{2b}} \right) 10^{0.1L_{2b}} \right]$$

Este método tiene en cuenta todos los aspectos del ruido por tráfico viario en el lateral de la carretera, incluyendo: el ruido motor, el ruido de escape, el de transmisión, el de rodadura y el aerodinámico. Además, se considera un método puntual y se debe asegurar que el punto elegido para la caracterización de la mezcla en servicio sea representativo de la capa de rodadura de todo el tramo de ensayo que se evalúa. Este requisito exigido a esta técnica es difícil de conseguir en la mayoría de las capas de rodadura, en donde las variaciones del nivel sonoro, con la misma mezcla, pueden alcanzar varios dB(A).

Debido a la rigurosidad de las especificaciones para el posicionamiento de la medida (no deben existir obstáculos tales como barreras de seguridad en las cercanías o muros reflectantes detrás del micrófono), este método puede ser difícil de utilizar en entornos urbanos. Además, dado el tiempo requerido para realizar las medidas, se hace difícil tener un estudio global de una infraestructura viaria de gran longitud, sino que lo que se tienen son datos de alguna posición aislada de la vía.

Por otro lado, con el método CPX se mide la interacción neumático/pavimento, directamente de la capa de rodadura del tramo de prueba, fabricado con la mezcla que se desea acreditar. Para ello se puede utilizar un

remolque con una cámara parcialmente anecoica. En su interior se monta el neumático de referencia sobre el que se va a medir el ruido de rodadura con la ayuda de unos micrófonos situados en posiciones fijas, próximas al neumático. Al contrario que con el método SPB, el método CPX permite obtener medidas de forma continua sobre todo el tramo de prueba.

Los niveles sonoros registrados cada 10-20 m, aproximadamente, son niveles sonoros integrados cada dicha distancia; es decir,

$$L_{Aeq}[M] = 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{1}{L_2 - L_1} \int_{L_1}^{L_2} \frac{P^2_{ref}(x)}{P^2_{ref}} dx \right]$$

Otra de las ventajas que tiene esta metodología es la utilización de un sistema GPS para asociar coordenadas de posicionamiento global con niveles sonoros, velocidad, temperatura, de forma sincronizada y continua.

El método CPX fue descrito en el borrador de norma ISO/CD 11819-2 (2000). En la metodología desarrollada por el LA²IC y utilizada hasta el momento, se han realizado ciertas modificaciones sobre dicho borrador. Como consecuencia, el índice que se utiliza aplica el ya conocido nivel sonoro de interacción neumático pavimento en proximidad, L_{CPX} dB(A) [ver referencias].

2. Valores de referencia

Unos valores de referencia para los niveles sonoros registrados durante los ensayos para la acreditación son fundamentales para un posible eco-etiquetado ambiental de una mezcla; es decir, para acreditar la capacidad sono-reductora de una mezcla extendida en un tramo de prueba. Esta eco-etiqueta acredita a la mezcla en la etapa de utilización de dicho producto.

La metodología de acreditación LA²IC acústica define tales valores de referencia para dos velocidades de tráfico, aquellas que nos pueden resultar más útiles para mezclas que se utilizan en zonas urbanas o periurbanas: 50 km/h y 80 km/h. Estos valores de referencia se derivan de la experiencia del Laboratorio en la medida y caracterización acústica en proximidad de pavimentos [ver referencias].

Los valores de referencia CPX se corresponden con el sonido generado por una mezcla tipo, hormigón bituminoso AC16 surf S (de acuerdo con la especificación europea) con unos 8 años desde su puesta en servicio. La experiencia acumulada nos lleva a fijar estos valores, para un neumático de referencia convencional Pirelli P6000, a una temperatura ambiente media de 20° C en:

- 90 dB(A) L_{CPTr} (CPX) $_{LA2IC}$ a velocidad de 50 km/h.
- 98 dB(A) L_{CPTr} (CPX) $_{LA2IC}$ a velocidad de 80 km/h.

3. Establecimiento de Clases de MBSR

Cuando un constructor quiera confirmar o comprobar las características para la reducción sonora de una de sus mezclas, tanto en el momento de ponerse en servicio como después de algún tiempo de ello, se necesitará acreditar una de las Clases de MBSR para su mezcla.

La mezcla se ensaya sobre un tramo de prueba o tramo experimental, en donde sea posible realizar medidas CPX. Los valores obtenidos comparados con los valores de referencia darán la capacidad de dichas mezclas (y de su puesta en obra) en la reducción del ruido. Si se tratara de ensayos realizados después de un periodo desde su puesta en servicio, los resultados, además, reflejarían el comportamiento de la mezcla frente al paso del tiempo, en donde influye el diseño de ésta, la fabricación, la puesta en obra, las condiciones ambientales y tráfico soportado.

Cuando se acredite la capacidad para reducir el sonido de una mezcla se obtendrá una de las Clases de MBSR mostradas en la Figura A2.

La acreditación indicará el tipo de clase a la que pertenece la mezcla ensayada en un tramo de prueba o en servicio, y la velocidad para la que está acreditada como MBSR, como se muestra en la Figura A3.

Aquellas mezclas en servicio que no tengan una capacidad para reducir el sonido no serán acreditadas como mezclas bituminosas sono-reductoras. En la actualidad la mayoría de las mezclas investigadas pertenecen a la Clase B o C.

MEDIDAS ACÚSTICAS EN LA ACREDITACIÓN $_{LA2IC}$ DE MBSR

Los resultados de las medidas se expresan en valores L_{CPTr} (CPX) $_{LA2IC}$ para tres neumáticos de referencia de vehículos ligeros; hemos de tener presente que estas Clases de acreditación estará destinada a mezclas para tramos urbanos o periurbanos en donde la contribución al ruido de rodadura de los vehículos pesados no será importante.

MBSR Clases	A	B	C
Reducción Sonora (dB(A)) (Referencia AC 10 sus F S)	>3	1.5 < <3	<1.5
	Reducción sonora excelente	Reducción sonora buena	Reducción sonora aceptable

Figura A2. Clases de mezclas sono-reductoras establecidas por el LA^{2IC} .

Esta acreditación $_{LA2IC}$ no tiene restricciones sobre el periodo en el que se ha de realizar;

tan válido es realizarlo en un tramo de prueba antes de su puesta en servicio, como después de un periodo de 6 meses o 12 meses desde su construcción. Es recomendable hacerlo tanto en las condiciones iniciales como después de un periodo de servicio y un volumen de tráfico soportado; lo que se espera de una buena MBSR es un buen comportamiento sono-reductor a lo largo de su vida útil. Esta acreditación será válida durante 5 años o hasta que se detecten deterioros significativos en la capa de rodadura.



Figura A3. Ejemplo de etiqueta ecológica que acredita la capacidad sono-reductora de una mezcla bituminosa como Clase A, para una velocidad de 80 km/h.

El tramo de prueba, o la vía en donde esté extendida la mezcla bituminosa y se vayan a realizar las medidas, tendrá una longitud de al menos unos 100 m. Se realizarán al menos 4 pasadas con cada uno de los 3 neumáticos de referencia, a la velocidad para la que se esté acreditando.

Durante los ensayos de acreditación acústica, el nivel de presión sonora durante la rodadura, la velocidad de rodadura, y las coordenadas de posición global (GPS) serán registradas, por ejemplo, cada 20 m, a lo largo del tramo de medida a evaluar. Además, será registrada la temperatura ambiente y de la capa de rodadura y la presión del neumático en caliente y frío. El nivel de presión sonora será medido y analizado en bandas de tercios de octava. Los niveles sonoros serán normalizados a las velocidades de referencia de 50 km/h, 80 km/h y, cuando sea posible, 110 km/h.

Cuando no sea posible mantener totalmente constante la velocidad de referencia se hará un tratamiento posterior de resultados para corregir la influencia de estas desviaciones, y normalizar los niveles sonoros a la velocidad de referencia. Para ello se utilizará la expresión:

$$L_{\text{corregido}} = L_{\text{medido}} - B \cdot \log\left(\frac{v}{v_{\text{ref.encia}}}\right)$$

Siendo $v_{\text{referencia}}$ la velocidad de referencia seleccionada, v la velocidad registrada en cada momento y B la constante de velocidad, que se determina a partir de distintas mediciones del comportamiento de los niveles sonoros frente a la velocidad.

Los valores globales del indicador de ruido en proximidad $ICPX_{LA2IC}$ para cada uno de los pavimentos acreditados han de ser determinados, comparados y presentados junto con la información en bandas de frecuencia en 1/3 octava. Es recomendable que los resultados, además, incluyan:

- Los espectros medios en el tramo de ensayo, a diferentes velocidades.
- La curva del comportamiento acústico frente a la velocidad, siempre que sea posible, entre aproximadamente 30 km/h y 110 km/h.
- La caracterización de la macrotextura de la superficie de la vía.
- La caracterización de la "rigidez" de la superficie.
- El espectro de absorción sonora, al menos entre 50 Hz y 1600 Hz asociado a la mezcla extendida.

Los resultados de los niveles sonoros han de ser normalizados a la temperatura de referencia de 20 °C, debido a la dependencia del ruido de rodadura con la temperatura.

Para los ensayos sonoros se vienen utilizando los neumáticos de referencia: Pirelli P6000 205/55 R16, Avon ZV-1 y Avon Enviro CR-322.

El nivel de ruido de interacción neumático/pavimento medido en proximidad, $ICPX_{LA2IC}$ en dB(A), se determina aplicando la expresión siguiente:



Figura A3. Tubo de impedancia utilizado para la medida de la absorción acústica entre 50 Hz y 1600 Hz de una probeta de mezcla bituminosas.



Figura A4. Equipo para la medida del perfil longitudinal de la superficie de la carretera, y su posterior análisis para obtener la MPD.

$$ICPX_{LA2IC} = \frac{1}{3} L_{CPV}(N1) + \frac{1}{3} L_{CPV}(N2) + \frac{1}{3} L_{CPV}(N3) + \epsilon$$

en donde:

- L_{CPV} es el nivel sonoro global, valor medio de dos micrófonos, delantero y trasero; es decir

$$L_{CPV} = \frac{L_{Aeq, MicroD} + L_{Aeq, MicroT}}{2}$$

- N1, N2 y N3 hace referencia a los neumáticos de referencia utilizados, y

- ε hace referencia a una constante de corrección ($=0$ para el TiresonicMk4-LA²IC) medida en dB(A).

El documento de acreditación irá acompañado por un informe de los resultados de las medidas CPX y de la fórmula de trabajo de la mezcla, además de los detalles del tramo de ensayo.

En aquellos casos en los que no se obtenga la acreditación deberá justificarse, en la medida de lo posible, dicho resultado. Para ello, se exigirá la medida de la capacidad de absorción sonora de la mezcla extendida; se podrán utilizar testigos o probetas compactadas con la mezcla extendida en el tramo de prueba para medir la absorción sonora en incidencia normal con tubo de impedancia (Figura A3). Además, se medirá, de forma simultánea con los niveles sonoros de rodadura en proximidad, el perfil de la superficie de la carretera para su posterior análisis (Figura A4). De este estudio se obtendrá el perfil del parámetro MPD (que se correlaciona con los resultados obtenidos con el círculo de arena) y del espectro de textura, que también se podrá realizar con un ensayo estático (Figura A5). Finalmente se podrá realizar la medida in situ de la rigidez dinámica de la mezcla (Figura A6). 



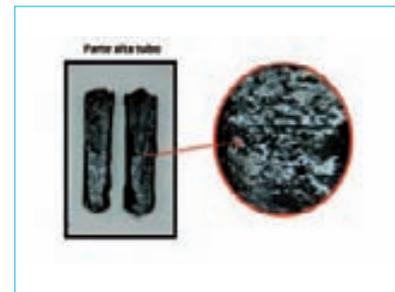
Figura A5. Equipo para la medida del perfil y obtención del espectro de la textura.



Figura A6. Excitador y cabeza de impedancia para la medida de la rigidez dinámica de la capa de rodadura in situ.



Emulsiones modificadas con polvo de neumático fuera de uso. NFU-Emulsiones



Nuria QUEROL SOLA

Sorigué

RESUMEN

En España se generan más de 300.000 toneladas al año de neumáticos fuera de uso (NFU), sin contar el “stock histórico” estimado ya en más de tres millones de toneladas. Esta cifra ha llevado al Ministerio de Medio Ambiente ha elaborar un Plan Nacional de Neumáticos Fuera de Uso para contribuir en la disminución de dichas cantidades siempre que sea técnica y económicamente posible.

En consecuencia, el Pliego General de Prescripciones Técnicas para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) establece su posible uso en las mezclas bituminosas. Recientemente se han desarrollado los betunes modificados, mejorados o de alta viscosidad con caucho procedente de NFU, empleándose en carreteras como ligantes de iguales o mejores prestaciones que los betunes modificados con polímeros. Recientemente, es posible encontrar un nuevo ligante en el mercado que contiene NFU en su formulación, las emulsiones modificadas con polvo de neumático fuera de uso, NFU-emulsiones.

Palabras clave: NFU (Neumáticos fuera de uso), Emulsiones modificadas, Sedimentación, Estabilidad.

INTRODUCCIÓN TEÓRICA

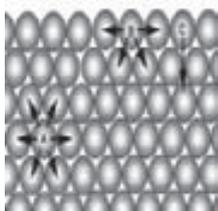
Se define emulsión asfáltica como sistema heterogéneo formado por dos o más fases líquidas, una fase continua, agua, y como mínimo una segunda fase líquida, betún, dispersada en forma de gotas.

Las emulsiones bituminosas son fluidos complejos. Su estabilidad depende de las fuerzas intermoleculares resultantes de las fuerzas atractivas y repulsivas que existen dentro de la estructura. Son sistemas termodinámicamente inestables, su inestabilidad se debe al aumento del área (ΔA) durante la emulsificación, que produce un incremento de la entalpía libre de Gibbs

$$(\Delta G): \Delta G = \gamma \times \Delta A$$

Donde:

γ = tensión interfacial



La estabilidad de las emulsiones se puede clasificar en: REVERSIBLE o IRREVERSIBLE.

SEDIMENTACIÓN REVERSIBLE

1. Cremado y sedimentación

El betún tiene una densidad ligeramente superior que el agua, por lo tanto, por efecto de la gravedad las gotas tienden a orientarse al fondo del recipiente; es cuando se produce la sedimentación. Si añadimos un solvente al betún, este puede adquirir menor densidad que el agua y orientarse hacia la superficie, este fenómeno se conoce como cremado:

Podemos predecir esta velocidad de sedimentación a través de la ley de Stokes:

$$V = \frac{2g \cdot r^2 (\delta \text{ glóbulos} - \delta \text{ fase continua})}{9 \eta}$$

Donde,

V= Velocidad final; cm/s

r = radio de las partículas; cm

δ glóbulos - δ fase continua = densidad fase dispersa y medio dispersante

g= aceleración de la gravedad; 980 cm / s²

η = viscosidad del medio dispersante; (g/cm/s)

Si δ glóbulos > δ fase continua $\rightarrow V > 0$ SEDIMENTACION

Si δ glóbulos < δ fase continua $\rightarrow V < 0$ CREMADO

Por lo tanto, el tamaño medio de una emulsión es directamente proporcional a la velocidad de sedimentación e inversamente proporcional a su viscosidad. Es decir, a menor tamaño medio, menor velocidad de sedimentación y mayor viscosidad para la misma concentración de betún asfáltico residual de la emulsión.

Resumiendo, la velocidad de sedimentación se puede reducir:

- Mejorando las condiciones de almacenado, manteniendo la emulsión a temperaturas bajas y/o agitando en periodos cortos de tiempo.
- Reduciendo la densidad del betún añadiendo un solvente.
- Previniendo la floculación cambiando el tipo y la concentración de tensioactivo o cambiando el pH.
- Aumentando el contenido de betún.
- Aumentando la viscosidad de la emulsión.
- Disminuyendo el tamaño de partícula de los glóbulos.

2. Floculación

La floculación es un proceso en el cual las gotas empiezan a unirse unas a otras. Normalmente hay una gota central de tamaño mayor rodeada de pequeñas gotas. Por lo tanto, cuanto mayor homogeneidad tenga la emulsión menor floculación. Normalmente la floculación desaparece con agitación.

La velocidad de floculación disminuye al reducir la concentración de la fase dispersa y en menor proporción al disminuir la temperatura, ya que la energía cinética de los glóbulos se incrementa al aumentar la temperatura.

SEDIMENTACIÓN IRREVERSIBLE

1. Coalescencia

Cuando dos gotas se fusionan y forman partículas más grandes, la emulsión normalmente tiende a romper. Este

efecto empieza con la floculación, pero no desaparece con agitación. Este efecto puede venir influenciado por el contenido de emulsionante, la elección de un mal emulsionante, utilización de temperaturas erróneas durante el proceso de producción o almacenado.

La velocidad de coalescencia depende de:

- La velocidad de floculación previa a la fusión de los glóbulos (por lo tanto, de la concentración de la fase dispersa).
- Las propiedades de la interfase (cargas eléctricas, características líquido cristalino)
- HLB (Balance Hidrofilico-Lipofílico) del emulsionante, composición química y concentración.

FABRICACIÓN DE UNA EMULSIÓN CON POLVO DE NEUMÁTICO

En el apartado anterior se ha querido enfatizar la importancia del tamaño de partícula de una emulsión en sus propiedades finales, así como la distribución granulométrica de estos tamaños, analíticamente llamado SPAM.

El tamaño de partícula y la distribución de este tamaño se controlan con la formulación, los productos químicos utilizados, y sobre todo con el sistema de fabricación.

En un sistema convencional se utilizan molinos coloidales, de alto poder de cizalla donde se trabaja con un betún a baja viscosidad, 800 – 200 mPa.s a temperaturas de entre 120-140°C, en régimen de trabajo turbulento, y una temperatura para la fase continua ácida de 40-60 °C. Este sistema de fabricación limita la viscosidad final de la emulsión, el tamaño medio y máximo de partícula así como la concentración de betún final en la emulsión.

Los parámetros que van a influir en las características finales de la emulsión son:

• ENERGÍA DE DISPERSIÓN:

La dispersión de una emulsión es causa de la energía mecánica y fisicoquímica aplicada. La energía mecánica, proporcionada por el molino divide el ligante en pequeñas partículas, la energía fisicoquímica viene dada por el emulsionante y debe:

- Reducir la tensión interfacial entre la fase hidrocarbonada (betún) y la fase acuosa (agua) para facilitar la emulsificación.

- Crear una película protectora alrededor de las partículas.

En otras palabras, tiene que haber suficiente energía mecánica para proveer las partículas de ligante de un tamaño y concentración correcta, así como suficiente tensioactivo para mantener la estabilidad de la emulsión.

• SHEAR RATE:

Además de las materias primas utilizadas, la formulación, el tamaño y la distribución se controlan con el shear rate.

El objetivo es mejorar la formación y distribución de las partículas de betún.

Los tamaños finales que se consiguen dependen directamente del método de fabricación utilizado y se pueden expresar como:

$$\text{Shear Rate} = 2\pi RV / 60E$$

Donde:

- R = radio del Molino (rotor and stator combinación);
- V = velocidad de rotación (rpm);
- E = dimensión gap

Con sistemas convencionales de fabricación, se limita el tamaño medio de partícula para emulsiones fabricadas en 5 – 10 µm, pero tamaños máximos de hasta 50 µm. Con el sistema utilizado se trabaja con betunes a alta viscosidad, superiores a 5000 mPa.s y temperaturas bajas, alrededor de 100°C, con muy baja velocidad de agitación. Con este sistema de fabricación, utilizando los mismos productos químicos, y semejante formulación se consiguen emulsiones de alta concentración de betún asfáltico residual, con un tamaño medio 1-2 µm, de muy baja polidispersidad, y gran estabilidad al almacenamiento, que admiten la incorporación de diferentes aditivos, como puede ser el polvo de neumático.

DISEÑO DE LA EMULSIÓN

Se realizan diferentes formulaciones con concentraciones de betún asfáltico residual que oscilan entre el 55 y el 62% y concentraciones de caucho entre 1-6%. Para su emulsificación se emplea un tensioactivo tipo diamina con una concentración entre el 0,4%-0,6%. El caucho seleccionado, además de presentar una buena digestión con el betún, contiene una granulometría muy fina con

CARACTERÍSTICAS			NFU-EMULSIÓN	C60BP4
ENSAYO	NORMA	UNIDAD	VALOR	
Emulsión original				
Betún asfáltico residual	NLT-139	%	60	59
Tamizado	NLT-142	%	0,30	0,04
Viscosidad Saybolt	NLT-138	s	130	48
Sedimentación	NLT-140	%	2	5
Residuo por evaporación a 163°C (NLT-147)				
Penetración (25°C, 100g, 5s)	NLT-124	0,1 mm	76	130
Punto reblandecimiento A&B	NLT-125	°C	58	48

Tabla 1. Resumen de la caracterización físico-química inicial de la emulsión.



Gráfico 1. Representación de la Fuerza (N) frente a la deformación (mm) correspondiente al ensayo de Fuerza/ductilidad.

un tamaño de partículas inferior a 400 micras y una baja densidad de tal manera que su dispersión en el betún ha sido muy efectiva.

Los resultados presentados en esta comunicación corresponden tan solo a la formulación, que por el momento, han presentado mejores resultados.

PARTE EXPERIMENTAL

1. Caracterización física de la NFU-emulsión mediante los ensayos convencionales

Se realiza una primera caracterización físico-química de la emulsión basada en ensayos empíricos convencionales correspondientes al pliego de prescripciones técnicas. Estos se han comparado con los resultados de

una emulsión tipo C60BP4 modificada con polímeros. (Tabla 1).

La NFU-emulsión presenta unos valores muy altos de tamizado, puesto que no todo el NFU se digiere en la matriz del betún y se queda retenido en el tamiz de 0.8 μ m. Se trata de una emulsión muy viscosa, con valores de 130s (poco más de 2 minutos) que casi triplican los de una emulsión convencional a mismo contenido de betún asfáltico residual.

Pero un parámetro importante a destacar, es su excelente valor de sedimentación, de tan solo el 2%, lo que significa que la emulsión es muy estable al almacenamiento. Por último destacar que se trata de una emulsión modificada con un residuo de betún asfáltico más duro que su homólogo, por las prestaciones que les confiere el NFU al betún.

Se evalúan también sus propiedades elásticas a través del ensayo de fuerza/ductilidad UNE-EN 13589 por ser una emulsión modificada y los

resultados obtenidos se observan en el Gráfico 1.

Según la norma UNE-EN 13589: determinación de las propiedades de tracción de betunes modificados por el método de fuerza ductilidad y la norma UNE-EN 13703: Determinación de la energía de deformación se puede llegar a obtener un valor para la cohesión fuerza ductilidad a 5°C según la fórmula siguiente:

$$E_i = n_i \times E_u$$

Donde:

$$E_u = d_u \times F_u$$

$$du = \frac{D}{V \times t}$$

D = elongación de la probeta

V = velocidad del papel de registro

t = tiempo necesario para realizar el ensayo

Los valores de energía están por debajo de los exigidos para una emulsión C60BP4 convencional si bien, la cantidad de NFU que contenían estas muestras era inferior a la cantidad de polímero equivalente que contiene una emulsión C60BP4.

E DEFORMACIÓN	N FUEMULSIÓN 1	N FUEMULSIÓN 2	C60BP4
J/cm ²	0.406	0.563	≥ 1

Tabla 2. Resumen de las energías de deformación para las diferentes muestras de emulsión.

2. Determinación del tamaño de partícula

Se determina también, el tamaño de partícula de estas emulsiones por ser un parámetro muy importante como ya hemos comentado anteriormente.

Para su determinación granulométrica se utiliza la técnica de difracción láser.

Como se puede observar en la siguiente tabla el tamaño medio de partícula de esta emulsión se encuentra en 4 micras, y el tamaño máximo en tan solo 8 micras.

TAMAÑO PARTÍCULA	T MÍNIMO (D0,1)	T MEDIO (D0,5)	T MÁXIMO (D0,9)
µm	1,980	4,004	7,982

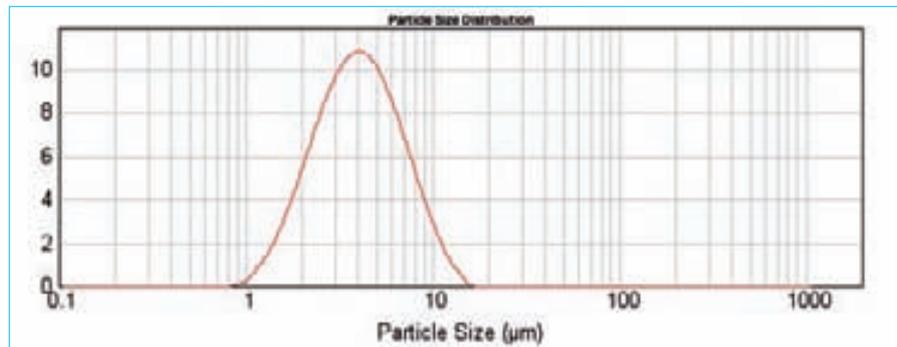


Figura 1. Granulometría de la emulsión modificada con polvo de neumático fuera de uso.

Estos resultados concuerdan con los excelentes valores de sedimentación presentados anteriormente, puesto que según la ley de STOKES, a menor tamaño medio de partícula menor velocidad de sedimentación.

3. Estudio de sedimentación

Finalmente, se dedica una especial atención al estudio de SEDIMENTACION, por ser una característica difícil de superar en los ligantes que contienen polvo de neumático fuera de uso en su formulación. Para ello se desarrollan dos métodos:

3.1 Método convencional a través de la norma NLT-140

En este caso se obtiene, como ya se ha comentado anteriormente, valores del 2% de sedimentación, valor que hace pensar que la fórmula empleada para la fabricación de estas NFU-emulsiones es adecuada y permite obtener una emulsión modificada con polvo de caucho muy estable en el tiempo.

3.2. Sedimentación A: estudio cualitativo y cuantitativo

Para poder analizar la dispersión del polvo de caucho en el seno de la emulsión así como comprobar la tendencia a la sedimentación de la NFU-emulsión, se utilizan dos tubos tipo tubo de "pasta de dientes", empleados para estudiar la estabilidad de los betunes modificados con polímero. En cada uno se introducen 150 mililitros de emulsión y se dejan durante siete días a temperatura ambiente como si se tratase del ensayo de sedimentación clásico. Transcurrido este periodo de reposo, los dos tubos se introducen en un congelador a una temperatura de -20°C durante 24 horas. Se corta uno de los dos tubos por la mitad con la finalidad de evaluar visualmente la dispersión del caucho mientras el segundo se corta en tres partes (ver Figuras 2, 3 y 4).

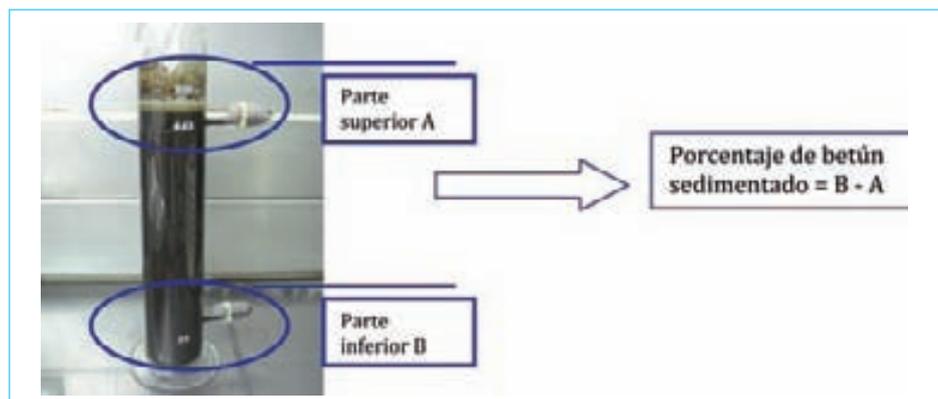


Figura 2. Probeta de sedimentación para emulsiones bituminosas.

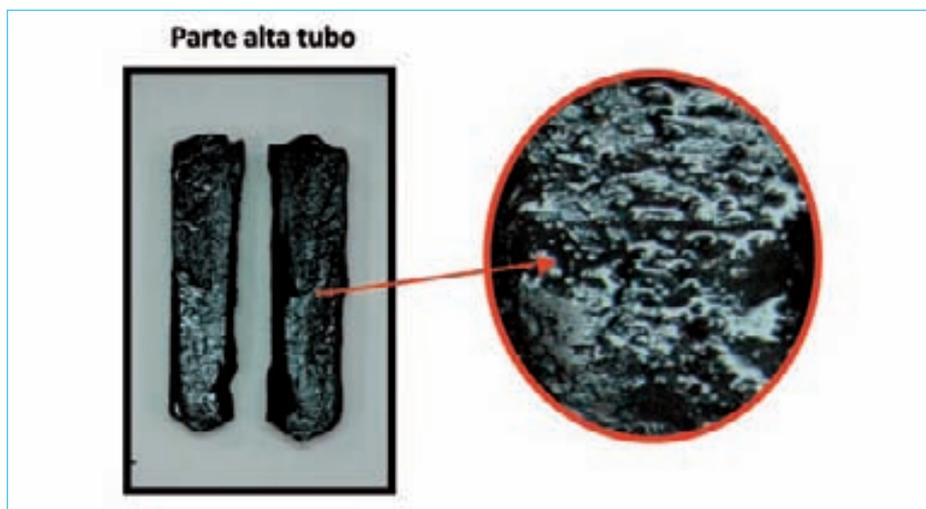


Figura 3. Evaluación visual de la dispersión del caucho en el seno de la emulsión.

Para determinar el grado de homogeneidad del ligante se elimina primero el agua por evaporación a una temperatura de 50°C y se controla por pesada la pérdida de agua hasta obtener un peso constante. Una vez completada la evaporación de agua se extrae el caucho con el tetrahidrofurano, con una proporción de 50 mililitros por 1 gramo de betún residual, y se determina el porcentaje de NFU en cada una.

Como se ha precisado antes, después de dejar en reposo la emulsión los siete días a temperatura ambiente y puesto a -20°C, la distribución del caucho se evalúa de dos maneras distintas:

3.2.1 Ensayo cualitativo

Se trata de una inspección visual de la distribución del NFU en el seno del betún.

Para ello se parte el tubo de dientes por la mitad y se observa la distribución del caucho:

3.2.2 Ensayo cuantitativo

En este caso, se corta el tubo en tres partes con la finalidad de determinar tras la evaporación completa del agua

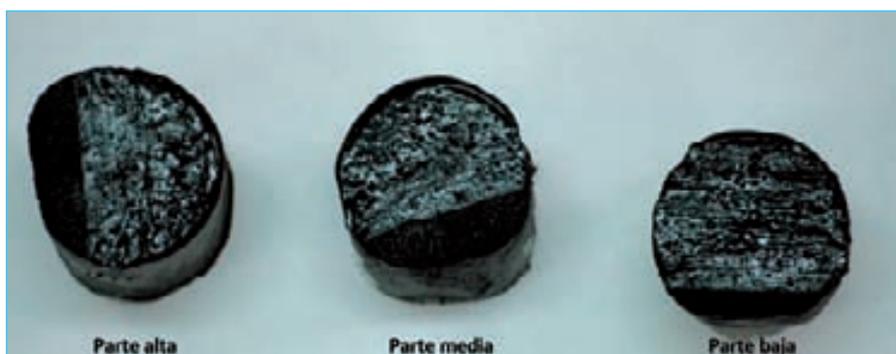


Figura 4. Método de análisis de la dispersión de NFU en la emulsión.

y una extracción con tetrahidrofurano la cantidad polvo de neumático fuera de uso en cada una de las partes.

Los porcentajes de caucho obtenidos para cada fracción han sido los que se recogen en la Tabla 3.

Como se puede ver, la distribución del NFU es bastante homogénea, los tres valores obtenidos son muy similares y demuestran una perfecta distribución del NFU en el volumen de la emulsión apoyando así la evaluación visual precedente y la excelente estabilidad determinada gracias al

ensayo de sedimentación de la NFU-emulsión.

4. Caracterización reológica del ligante residual de la NFU-emulsión

Los betunes son materiales viscoelásticos, es decir, al someterlos a una fuerza, la respuesta del material se traduce en dos componentes: una elástica, donde al retirarse la fuerza se recupera parte de la posición inicial, y otra viscosa, donde la deformación es permanente. Este comportamiento es función de la temperatura y de la carga aplicada. Así, para caracterizar correctamente un betún debemos medir al menos dos de sus propiedades: la resistencia del material a la deformación y su distribución entre sus componentes elástica y viscosa. La forma experimental de medir este comportamiento es a través de ensayos dinámicos de oscilación donde se utiliza un reómetro de corte dinámico (DSR) según el procedimiento descrito en la norma UNE EN 14770 – Determinación del módulo complejo y del ángulo de fase por medio de un reómetro de corte dinámico. Este

equipo permite evaluar el comportamiento viscoelástico de los ligantes a través de la medida del módulo complejo G^* , indicador de la relación entre la carga aplicada y la deformación medida, y del ángulo de fase, δ , referencia a la deformación recuperable y no recuperable, para los tres estados críticos del ligante.

Para estudiar el comportamiento del ligante podemos estudiar

tres áreas críticas de temperatura e intentar correlacionarlas con las propiedades finales del ligante:

- $T > 100^{\circ}\text{C}$: Los betunes se comportan como fluidos newtonianos. La medida de la viscosidad es suficiente para evaluar su trabajabilidad. Esta es independiente del tiempo de carga aplicado.
- $45 > T > 85^{\circ}\text{C}$: Los fallos en el pavimento son causados mayoritariamente por deformaciones plásticas. Es necesario medir G^* y δ para conocer su comportamiento. Cuanto mayor sea G^* , mayor resistencia a la deformación, por lo tanto menor fallo por deformaciones plásticas; y cuanto menor sea δ , mayor comportamiento elástico del ligante, por tanto menor fallo a deformaciones plásticas. Estos fallos son función de la carga aplicada, por lo tanto, debe considerarse el estudio a tiempos de carga rápidos, que se traducen en medidas realizadas a 10 rad/s, que son equivalentes a velocidades de 75-90 km/h.
- $0 > T > 45^{\circ}\text{C}$: En este caso, los fallos en el pavimento son causados mayoritariamente por fallos a fatiga causada por la repetición de ciclos de carga. A dichas temperaturas los betunes son más duros y menos elásticos. Nuevamente debemos medir G^* y δ , pues el daño producido será función de cuanta deformación se produce y cuanta de esa deformación es recuperable. Los resultados serán también función del tiempo de carga, por tanto debemos realizar los ensayos a 10 rad/s, es decir 1.59 Hz.

Además de los criterios SUPERPAVE utilizados para evaluar el comportamiento de los diferentes ligantes a las deformaciones plásticas y fatiga, se realiza un barrido de frecuencia de las muestras entre 0.01 y 10 Hz a dos temperaturas de ensayo: 25°C y 58°C para estudiar la variación de módulos a cargas lentas y rápidas.

Se analiza el betún residual de la NFU-emulsión y se compara con el ligante residual de una emulsión modificada con polímeros, y como referencia se representan también los resultados de betún modificado con polvo de caucho (BMC-3b), un betún modificado

	PARTE DEL TUBO	% DE NFU
Caso	Alta	3,6%
	Intermedia	3,5%
	Baja	4,2%

Tabla 3. Resumen del % de caucho obtenido con el THF en cada fracción.

do con polímero (BM-3b), que sería el que mayor comportamiento elástico debería presentar.

Todos los ligantes han sido caracterizados en su estado original. Los resultados obtenidos se representan a través del diagrama de Black, variación del módulo complejo, G^* ; con la variación del ángulo de fase, δ , y variación del módulo en función de la frecuencia.

En el diagrama de Black se observan bien dos comportamientos claramente diferenciados: un comportamiento lineal, consecuencia de la escasa contribución elástica, y un comportamiento en forma de S, típico de los ligantes que contienen polímeros, debido a la interacción del comportamiento elástico el polímero y el comportamiento viscoelástico del ligante modificado. En la Figura 5 queda representado el comportamiento de estos cuatro ligantes:

Se observa que el ligante que mayor comportamiento elástico presenta, curva en S, es el correspondiente al betún modificado con polímeros, representado en color verde, seguido del betún modificado con polvo de neumático fuera de uso, color azul, y el residuo de la emulsión modificada con polímeros, color granate. Por

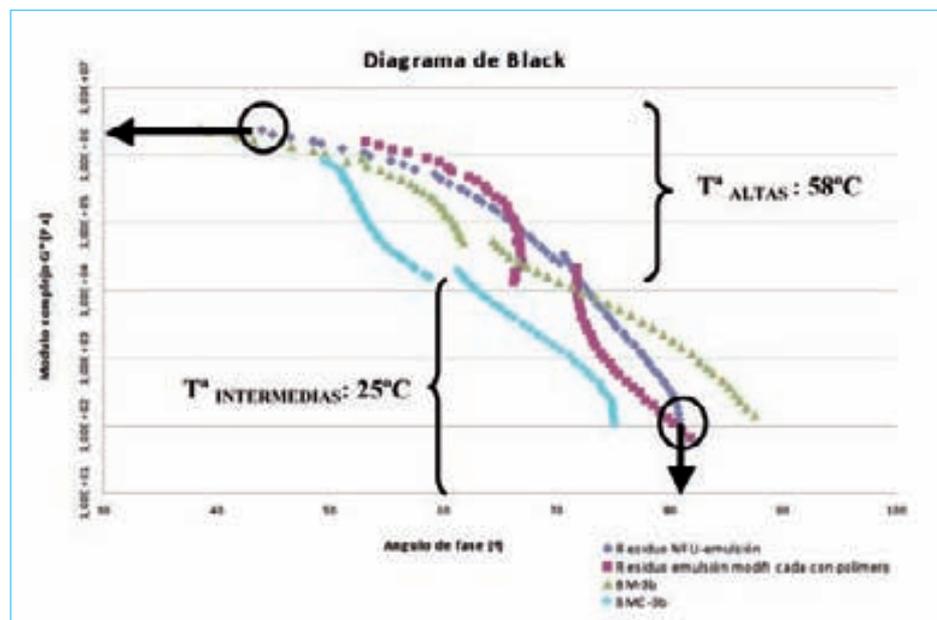


Figura 8. Diagrama de Black de los cuatro ligantes estudiados.

último, el ligante con menor comportamiento elástico es el correspondiente al residuo de la emulsión con polvo de neumático, ya que la cantidad de caucho incorporada es todavía muy pequeña para que esta propiedad pueda ser significativa.

También se puede ver claramente la diferencia de comportamiento viscoelástico entre los diferentes ligantes. A altas temperaturas, el ligante que presenta mayores valores de G^* , es decir mayor resistencia a la deformación, es el correspondiente al betún modificado con polímeros, pero cabe observar que el valor del betún residual de la NFU-emulsión es prácticamente el mismo. Mientras que a temperaturas intermedias, el menor valor de δ , comportamiento más elástico, corresponde al betún modificado con caucho, seguido por el residuo de la NFU-emulsión que contendría el mismo valor que el residuo de la emulsión modificada con polímeros.

En la Figura 8 se representan los módulos G' (contribución elástica) y G'' (contribución viscosa) a temperatura intermedia, 25°C, en todo el rango frecuencia para el residuo de la NFU-emulsión y para el residuo de una emulsión modificada con polímeros. Los dos residuos tienen un comportamiento mayormente viscoso, pues los valores de G'' se encuentran en todo el rango de frecuencias por encima de los valores de G' . Para cargas lentas, frecuencias de 0.01Hz, el residuo de la NFU da valores inferiores, es decir, peor comportamiento a fatiga, si bien, para cargas rápidas, frecuencias de 10 Hz, ambos ligantes tienen comportamientos similares.

CONCLUSIONES

- Existe una nueva generación de emulsiones modificadas formuladas con polvo de caucho procedente de neumáticos fuera de uso, estables al almacenamiento.
- Los ensayos de caracterización físico-química iniciales permiten apreciar las características de este ligante comparables con una emulsión modificada con polímeros común del mercado. Cabe destacar los excelentes

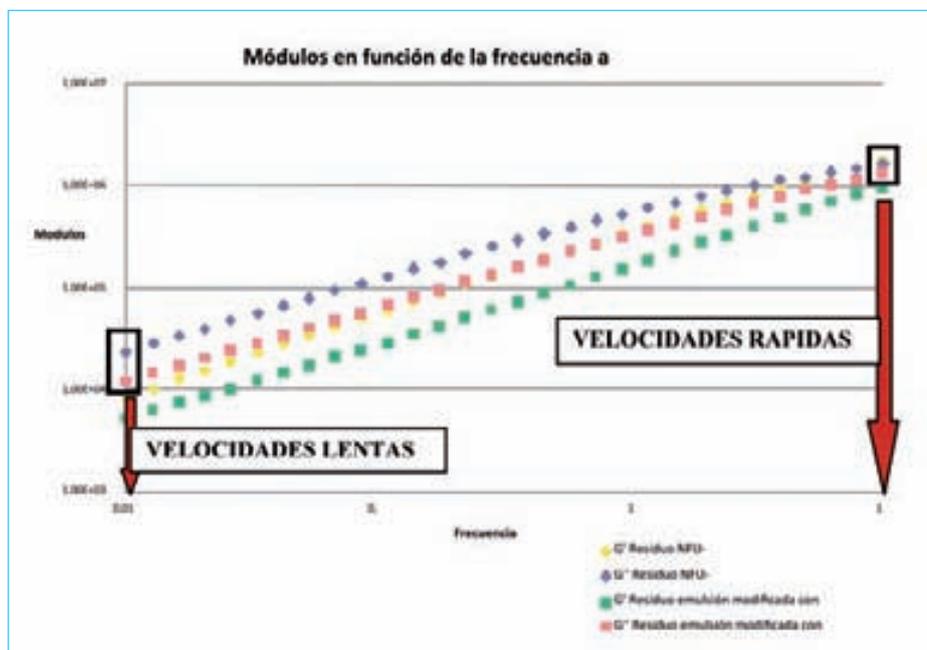


Figura 9. Módulos elásticos y viscosos en función de la frecuencia del residuo de una emulsión modificada con polímero y del residuo de la NFU-emulsión a 25°C.

valores obtenidos en el ensayo NLT-140 correspondientes al ensayo de sedimentación.

- El ensayo de fuerza ductilidad UNE-EN 13589 muestra que se trata de una emulsión con un alto valor de cohesión si tenemos en cuenta que la cantidad de caucho que contiene está muy por debajo de la cantidad de polímero utilizado para formular una emulsión modificada.
- Los resultados del ensayo cualitativo junto con los del ensayo cuantitativo con THF ratifican los excelentes valores obtenidos en el ensayo de sedimentación.
- Según el diagrama de Black el comportamiento elástico de la NFU-emulsión es muy poco significativo comparado con una posible emulsión homóloga C60BP4, pero la cantidad máxima de caucho que se puede incorporar en estas emulsiones está todavía por determinar y esta propiedad puede variar significativamente. Para temperaturas altas, 58°C, el valor de G^* para el residuo de la NFU-emulsión es prácticamente igual al de la emulsión modificada con polímeros. Y para temperaturas intermedias, 25°C, el valor de δ es igual para los dos ligantes anteriormente mencionados.
- En el barrido de frecuencias, para velocidades lentas, el residuo de la emulsión modificada con polímeros presenta mejores resultados, pero para cargas rápidas los valores de G'' son iguales para los dos ligantes.

Con la puesta a punto de la formulación de la última generación de emulsión modificada con polvo de caucho procedente de los neumáticos fuera de uso, SORIGUÉ consigue unir las ventajas de la utilización de las emulsiones en la construcción de carreteras a las ventajas aportadas por el ligante modificado con caucho con un compromiso medioambiental importante colaborando con este nuevo ligante en su reutilización, revalorización y eliminación de este residuo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- I. Dupon. 2009: Invention et évolution des pneumatiques, www.moto-histo.com/pneus/pneus.htm.
- II. CEDEX. , Mayo 2007.Ministerio de Medio Ambiente: Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas
- III. Samaraez 2008. Chemical Consulting: Reciclaje de neumáticos fuera de uso – Trituración mecánica.
- IV. POTTI, Juan Jose. Enero-.Febrero 2005: Innovaciones en ligantes bituminosos, Revista CARRETERAS, núm. 138,
- V. COLAS VICTORIA Ma Mar, et al. 2008. Reología de los betunes con caucho, VIII Congreso Nacional de firmes.
- VI. UNE-EN 1429. Octubre 2009.: Determinación del residuo por tamizado de las emulsiones bituminosas, y determinación de la estabilidad al almacenamiento por tamizado,
- VII. NLT – 138. 1999. Viscosidad Saybolt de las emulsiones bituminosas,
- VIII. NLT – 140 Octubre 2009. Sedimentación de las emulsiones bituminosas, [10] UNE-EN 12847: Determinación de la tendencia a la sedimentación de las emulsiones bituminosas,
- IX. ISO 13320: Diciembre 2009 Particle size analysis – Laser diffraction methods,.
- X. Potti, JJ. Septiembre-Octubre 1999. "Emulsiones catiónicas de rotura lenta en carreteras. Primeros resultados del proyecto Europeo Optel". Revista "Carreteras" número 103 páginas 81- 97.
- XI. K. Van Nieuwenhuyze, et al. March 2001. "Understanding the relationship between emulsion properties and binder/emulsifier characteristics." European Research project. Cold Mix Technology. Revue Générale des Routes et des Aérodrômes número 793.
- XII. L. Bonakdar, J. et al. 2001"Rupturing of bitumen-in-water emulsions: experimental evidence for viscous sintering phenomena." Paper accepted for publication in Colloids and Surfaces, A: Physicochemical and Engineering Aspects 176. P.185-194.
- XIII. Y. Lendresse, et al. 7 -10 May 1996 "The performance of emulsion-grade bitumens. The use of a new method for characterising their interfacial properties, Eurasphalt & Eurobitume Congress, Strasbourg (France),, Paper n° 6.038. 



Reciclado total de mezcla bituminosa. Aplicación, experiencias reales y resultados



Jacinto Luis GARCÍA SANTIAGO

Director de Tecnología e I+D. SACYR

Francisco José LUCAS OCHOA

*Jefe de Asistencia Técnica y Desarrollo de Asfaltos.
Repsol Lubricantes y Especialidades, S.A.*

Francisco José BARCELÓ MARTÍNEZ

Coordinador de Asfaltos. Centro Tecnológico de Repsol. REPSOL, S.A.

RESUMEN

El producto generado por fresado de mezclas bituminosas, en la renovación de las capas deterioradas, está constituido por materiales de alto valor técnico y económico, cuya reutilización es deseable. Ello indicaría la conveniencia del empleo de mezclas que incorporen este material procedente de fresado en las mezclas de reposición, con una equivalencia prestacional respecto a mezclas sin dicha incorporación. Las nuevas mezclas de reposición pueden incorporar material del fresado generado, como es el caso de mezclas recicladas en caliente en planta. No obstante, las mezclas recicladas en caliente no permiten un reciclado total. Hay técnicas de reciclado a tasa total, como son las de los reciclados en frío con emulsión; sin embargo presentan limitaciones debidas a la necesidad de contar con un período de curado tras su puesta en obra. Por ello, ha parecido de gran interés el desarrollo de una nueva solución de mezcla que permita incorporar tasas mayores de reciclado, con el objetivo claro de alcanzar una tasa total, al 100% y que, a la vez, tuviese un alto nivel de prestaciones mecánicas y funcionales en modo de permitir su empleo en las capas de reposición. Paralelamente, en los últimos años han entrado con fuerza en España tecnologías enfocadas a la reducción de temperaturas de fabricación y aplicación de mezclas bituminosas. Así, una de las técnicas que posibilita esta reducción 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 son las que han llevado a Sacyr y Repsol a desarrollar esta tecnología específica, que combina las ventajas de ambas: reciclados a tasa total y reducción de las temperaturas de aplicación.

Palabras clave: Betunes caucho, Ensayo reológico, Módulo complejo, Ángulo de fase

INTRODUCCIÓN

La conservación del patrimonio viario implica unas operaciones planificadas de rehabilitación y conservación de su pavimento para mantener su adecuada durabilidad estructural y respuesta funcional. En la tipología de pavimento más extendida, la de los firmes bituminosos, una de las operaciones más habituales y frecuentes es la de fresado y retirada de las mezclas o capas deterioradas y envejecidas y su sustitución (reposición) por mezclas de nueva fabricación.

En esa operación, el producto generado por el fresado de mezclas bituminosas de las capas deterioradas (conocido en la literatura internacional con el acrónimo RAP, Reclaimed Asphalt Pavement), está constituido, en general, por materiales de muy alto valor técnico y económico, cuya reutilización o reciclado es conveniente. Por ello, sería deseable el empleo, en la capa de reposición, de mezclas que incorporen ese RAP generado en el fresado, con la condición de que presenten una equivalencia prestacional respecto a las mezclas convencionales sin RAP adecuadas a dicha capa.

Si el RAP cumple los criterios de calidad y uniformidad exigibles, debería ser reutilizado en su totalidad en la propia reposición, en orden a la máxima sostenibilidad de las infraestructuras viarias. No obstante, existe un déficit de soluciones que puedan consumir, en la misma obra, el RAP generado y que tengan suficiente nivel prestacional para permitir su aplicación en vías de tráfico alto.

Las mezclas recicladas en caliente en planta pueden incorporar RAP del fresado generado. No obstante, esta tecnología presenta un límite a la tasa de reciclado, situado poco más allá del 50%, por lo que no es posible, con esta técnica, volver a colocar en la misma capa todo el RAP generado. Hay técnicas de reciclado a tasa total, como son las de los reciclados en frío con emulsión; sin embargo presentan limitaciones debidas a la necesidad de contar con un período de curado y debilidad en prestaciones mecánicas en los primeros momentos tras su puesta en obra.

Por tanto, en gran parte de los casos, el excedente de material de fresado no reciclado da lugar a un residuo, dada la inexistencia actual de mezclas bituminosas recicladas capaces de absorberlo en su totalidad en la misma obra rehabilitada, cumpliendo los requisitos exigidos a las capas de rodadura o las situadas inmediatamente bajo la rodadura, en especial en vías de cierta importancia.

Por ello, resulta necesario el desarrollo de una nueva solución de mezcla bituminosa que permita incorporar tasas

mayores de reciclado, con el objetivo claro de 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, sin las limitaciones inherentes a los reciclados en frío citados.

En los últimos años en España, han entrado con fuerza tecnologías enfocadas a la reducción de temperaturas de fabricación y aplicación de mezclas bituminosas. Las razones de la irrupción de estas nuevas técnicas son evidentes: reducción de emisiones, eficiencia energética y mejora en las condiciones laborales de los operarios de esta industria. Así, una de las técnicas que posibilita esta reducción, 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 desarrollar, esta tecnología específica, que combina las ventajas de ambas: reciclados a tasa total y reducción de las temperaturas de aplicación.

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 para estas nuevas mezclas.
- La definición de las características de producción para su fabricación y ejemplo de una tecnología de fabricación adecuada
- Experimentación a escala real en carreteras en servicio y resultados de su aplicación

DESARROLLO DE UN NUEVO PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS RECICLADAS TEMPLADAS A TASA TOTAL

1. Introducción y planteamiento de su desarrollo

Al abordar el estudio de las mezclas templadas recicladas a tasa total, se ha detectado la carencia de un procedimiento adecuado para su diseño y caracterización en laboratorio.

Los gránulos del fresado (árido “negro”) presentarían un comportamiento plástico en el rango de las tempera-

turas previstas para su compactación, 70°C-80°C, que se situaría, en general, por encima del punto de reblandecimiento del ligante viejo que contienen, alejándose del comportamiento de sólido rígido que muestran los áridos tanto en las mezclas en frío (también el fresado 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).

La metodología de elaboración de las probetas y la energía de compactación a dar en la misma, debería contemplar esta particularidad, de modo que dichas probetas representasen adecuadamente la mezcla realmente presente en la capa de firme y sus propiedades, una vez fabricada a escala industrial, extendida y compactada.

A la vista de esta carencia, se ha planteado, proceder al desarrollo de un nuevo procedimiento de diseño y caracterización, adaptado especialmente a la problemática de estas mezclas, definiendo una metodología de elaboración de probetas y la energía de compactación a aplicar, a través de una calibración de los resultados de laboratorio con los obtenidos de testigos en capa real en obra, de mezclas fabricadas con la central descrita posteriormente.

Por ello, el desarrollo de esta nueva metodología para su caracterización en laboratorio debería estar convenientemente contrastada con fabricación y extendidos de mezcla en tramos de ensayo.

Este desarrollo se ha planteado con varias etapas interrelacionadas de estudio en laboratorio y pruebas de campo del modo siguiente:

- Estudios previos de laboratorio para caracterización del fresado, estudio y elaboración de probetas con distintas metodologías, análisis de huecos obtenidos y resto de propiedades, elección de la formulación para prueba preliminar de campo.
- Fabricación y puesta en obra de mezcla desarrollada en etapa anterior, 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.



Figura 1.

- Definición del procedimiento para diseño y caracterización de estas mezclas
- Validación final del procedimiento mediante prueba de campo adicional, con fabricación y extendido de mezcla y toma de muestras y caracterización de testigos tomados de la capa.

Así, una vez validado el procedimiento, ya se podría proceder al estudio, desarrollo y caracterización de diversas mezclas en laboratorio y a la selección de la más adecuada para el empleo previsto en cada caso.

En todo caso, para observar el comportamiento en servicio de firmes con estas mezclas y optimizar su campo de empleo, será necesario realizar tramos de ensayo.

2. Fase inicial: Selección método elaboración de probetas y energía de compactación

2.1 Metodología de elaboración de probetas, formulación para prueba de campo

Se han empleado varios fresados 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.

El primer paso ha sido el estudio de envueltas, manejabilidad, temperaturas de mezcla y compactación. De todas las condiciones ensayadas, se eligió la que puede considerarse cercana a unas condiciones convencionales de Obra, fijando los siguientes intervalos de temperaturas: de emulsión: 50°C, de calentamiento del RAP entre 90°C



Foto 1. Tramo de prueba inicial para testificación y retroanálisis (Octubre 2010).

- 100 °C, de mezcla entre 80 °C-90°C y de compactación sobre 70 °C.

Se han empleado y comparado los diferentes 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 concentración, 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 de lo que se va obtener a escala real.

Sobre esas probetas se han realizado los ensayos pertinentes 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 (que se remarca en gris en las tablas anteriores) para realizar el primer tramo de prueba a escala real, para testificación.

En esta mezcla, para tener también valores de referencia para comparar 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, fabricando según las condiciones estipuladas y compactando según 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.

2.2 Tramo inicial de prueba en planta

Una vez seleccionada la mezcla se procedió a realizar una primera prueba real en cuanto a fabricación, extensión y compactación de reciclado templado con un 3% de emulsión rejuvenecedora, para poder obtener datos reales de la mezcla fabricada y de la mezcla de la capa.

En la prueba, llevada a cabo en una de las instalaciones dispuestas en las obras de la A1, previamente adecuada para fabricar este tipo de mezcla, se extendieron dos calles, en el recinto de la propia planta, con distintos espesores de mezcla. Se empleó una compactación convencional, con rodillo metálico vibrante y un compactador de neumáticos, estando la temperatura de mezcla, al inicio de compactación, alrededor de los 80°C.

2.3 Testificación de la capa del tramo de prueba y selección de método para probetas

Se procedió, al día siguiente, a una intensa testificación de las capas, para posibilitar un retro-análisis para ajustar el procedimiento de laboratorio más adecuado en cuanto a método de elaboración de probetas cilíndricas. Se extrajeron 51 testigos sobre los que se midieron espesores, densidades, módulos de rigidez a tracción indirecta y resistencias a tracción indirecta en seco.

El análisis de todos estos resultados indicó que la compactadora giratoria era la herramienta más adecuada para la elaboración de probetas, con la que se obtenían densificaciones y propiedades mecánicas similares a las conseguidas en obra.

Se realizó un estudio, con el fresado empleado en el tramo, variando el número de ciclos.

Estos resultados junto a los datos de los testigos sirvieron para establecer la energía de compactación más adecuada para establecer el procedimiento de diseño.

3. Procedimiento

Con todo ello se procedió a perfilar el procedimiento de laboratorio que se propone como más adecuado para el estudio y caracterización de estas mezclas, basado en el empleo de la compactadora giratoria, y para tener los valores de referencia para el control de calidad de recepción de las mismas en obra.

Posteriormente, se procedió a realizar una validación del mismo, aplicándolo para formular y caracterizar una nueva mezclam con la que se realizó un segundo

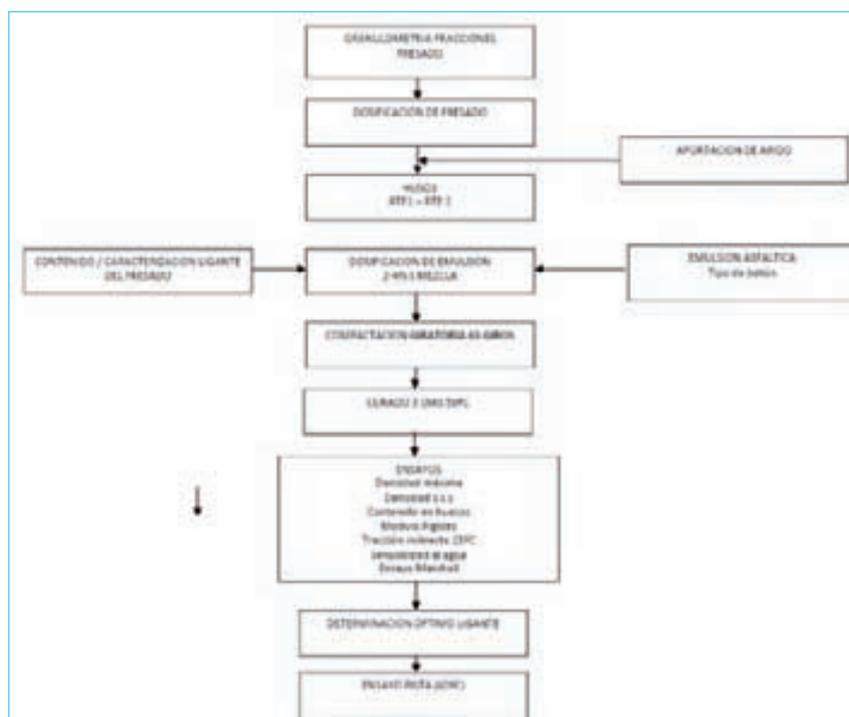


Figura 2. Esquema del método de diseño.

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, que se detalla en el apartado que sigue.

3.1 Procedimiento que se propone

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.

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.

En el diagrama que sigue se refleja la metodología que se propone y a continuación, Los aspectos más relevantes se exponen a continuación.

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. De los tramos homogéneos se determina el contenido de ligante del material de fresado y se determina la penetración y punto de reblandecimiento del ligan-

te recuperado. Asimismo, del árido obtenido, una vez extraído el ligante, 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 de probetas

La mezcla se realiza con el fresado 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 condiciones de compactación son: Presión de consolidación: 600 KPa, Angulo de giro: 0.82° y Velocidad de giro: > 31 r.p.m.

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:

- 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.

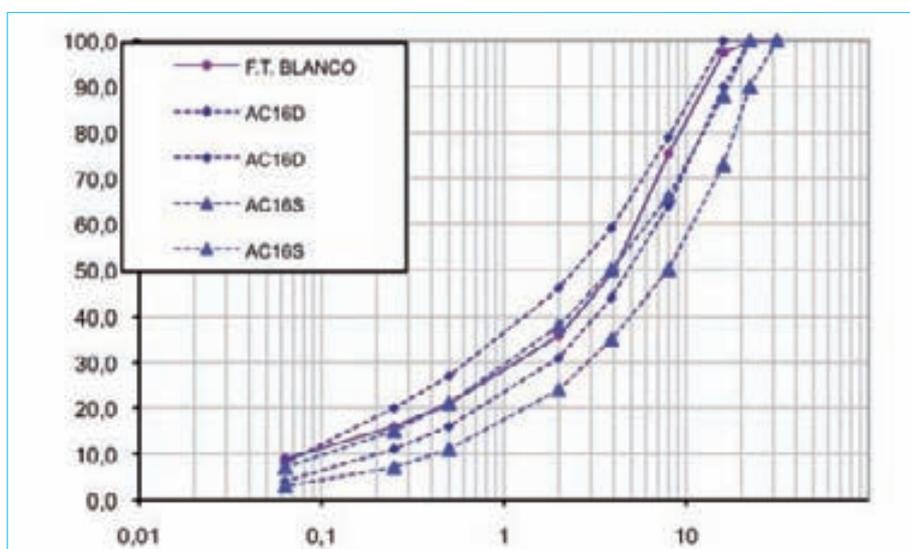


Figura 3. Huso granulométrico en BLANCO, tras extracción.

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 a soportar.
- Sensibilidad al agua, resistencia conservada superior al 90%.

Con el óptimo de ligante calculado, se procederá 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 realizará en ensayo de fatiga s/ UNE EN 12697-24 (anex. D).

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, 100g, 5s	124	1/10mm	183	66

Tabla 1. Propiedades de las emulsiones.

ESTUDIO DE FORMULACIÓN DE UNA MEZCLA RECICLADA

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

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.

Previo a su empleo en la mezcla el material procedente del fresado pasa por proceso de pretratamiento de RAP que incorpora la instalación (descrito en el apartado siguiente), que disgrega los tamaños de fresado más grandes y lo clasifica en dos fracciones, 5/25mm y 0/5 mm, para ser dosificadas con un control ponderal de ambas.

A efectos de formulación, la mezcla se estudia con las mismas proporciones relativas en que se producen en ese proceso. Además, la granulometría en negro resultante, debe encajar en los husos granulométricos considerados adecuados (tabla 20.1 del Art. 20 del PG-4).

En todo caso, dado que la temperatura de fabricación supera en más de 20°C la del punto de reblandecimiento, el proceso de mezclado producirá una disgregación adicional de los "gránulos negros", de modo que la granulometría final que gobierna la mezcla reciclada,

la que se puede usar a efectos de control de la mezcla fabricada, será muy próxima, o incluso igual, a la obtenida tras la extracción el ligante.

Por ello se establece un control, de ajuste de la granulometría obtenida tras extracción de ligante a la prevista en la formulación. Así la mezcla de las fracciones del RAP pretratado (fracciones 0/5 y 5/25 mm) se ha analizado mediante análisis granulométrico sin ligante.

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

Ligantes

Se han considerado dos tipos de emulsiones, una con ligante residual rejuvenecedor de penetración relativamente alta (150/200) y otra con ligante residual convencional de penetración relativamente baja (60/70), con similares porcentajes de concentración de ligante residual.

Las emulsiones empleadas tienen las siguientes características:

	MEZCLA RECICLADA TEMPLADA	
Tipo de emulsión	ECL2 reju	ECL2 50/70
Contenido de emulsión	2.5 %	2.5%
Ensayo de Inmersión -Compresión(NLT162)		
Resistencia en seco (MPa)	4.7	
Resistencia conservada	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)	2638	2891
Módulo dinámico a compresión a 20°C (NLT349) (Mpa) / ángulo desfase (°)	8166 / 17	9964 / 16.5

Tabla 2. Caracterización de Mezclas.

	MEZCLA RECICLADA TEMPLADA	
Tipo de emulsión	ECL2 rejuv	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)	5936	6331
ε6	130	143
y = a * x -b		
a:	0.0015	0.0015
b:	0.177	0.170

Tabla 3. Leyes de fatiga.

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 la Tabla 2.

Además de los ensayos de caracterización de módulo de rigidez, también se realizaron ensayos para determinar el Módulo Dinámico a compresión, según norma NLT349 a 20 °C.

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 (40°C, 50°C y 60 °C) y tipo de emulsión en los resultados de dicho ensayo de pista según UNE EN 12697 - 22.

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

Los resultados se resumen en la Tabla 3.

TECNOLOGÍAS DE PRODUCCIÓN

Estas mezclas tienen algunas singularidades respecto a otras mezclas bituminosas, relativas al proceso de fabricación ya que su fabricación, en el entorno de los 90°C, presentan unos problemas específicos, a los que se ha conseguido hacer frente satisfactoriamente tras un importante desarrollo, como son los de:

- Calentamiento directo del material de fresado (RAP). Al no haber transferencia de calor desde áridos sobrecalentados, como ocurre con las mezclas recicladas en caliente, el calentamiento del RAP ha de hacerse de modo que no se dañe o envejezca el ligante del mismo.

El sistema empleado es el de un tambor calentador de flujo paralelo (el material avanza en el mismo sentido que los gases calientes) con cámara de combustión retrada, en el que el calentamiento del RAP se hace por aire caliente, sin contacto ni proximidad a las llamas del quemador o zonas de alta temperatura.

Se ha introducido además una innovación, consistente en la recirculación parcial de los gases del tambor secador, lo que reduce la presencia de oxígeno en contacto con el RAP caliente y, consecuentemente su envejecimiento, además de otras ventajas funcionales y de rendimiento térmico.

- Pegajosidad del RAP caliente. Este ha sido uno de los problemas más complejos, debido a se acentúa precisamente en el entorno de los 80°C-100°C, mientras que superando los 110°C (como ocurre en reciclado en caliente) se aminora o desaparece. Ello ha llevado a unos rediseños sucesivos del circuito de almacenamiento y dosificación del RAP ya calentado, hasta conseguir un funcionamiento adecuado.

La instalación incorpora un proceso de clasificación previa del material de fresado en dos fracciones (0-5 y 5/25 mm) y control ponderal de su proporción en la mezcla a fin de asegurar la regularidad de composición.

Esta planta es una adaptación, específicamente desarrollada para reciclados templados, desarrollada a partir del equipo de fabricación de mezclas recicladas en caliente de alta tasa, con tecnología discontinua, de dos tambores de secado y calentamiento, uno de ellos específico para calentamiento de material de fresado de mezclas bituminosas.

Las características más reseñables del equipo son:

- Planta de fabricación de mezclas en caliente en proceso discontinuo, Intrame UM260, de 260 tns hora de capacidad de doble tambor:

- Secador de áridos de contraflujo, de 260 tns hora de capacidad.
- Tambor calentador de material de fresado (RAP), de flujo paralelo y cámara de combustión retrasada de 130 tns. hora de capacidad.
- 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.

Tolva de almacenamiento de RAP caliente y sistema de pesado, para alimentación discontinua a mezclador.

Para la adaptación para fabricación de reciclados templados se han incorporado:

- Depósitos y circuito de alimentación de emulsión a básica 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.

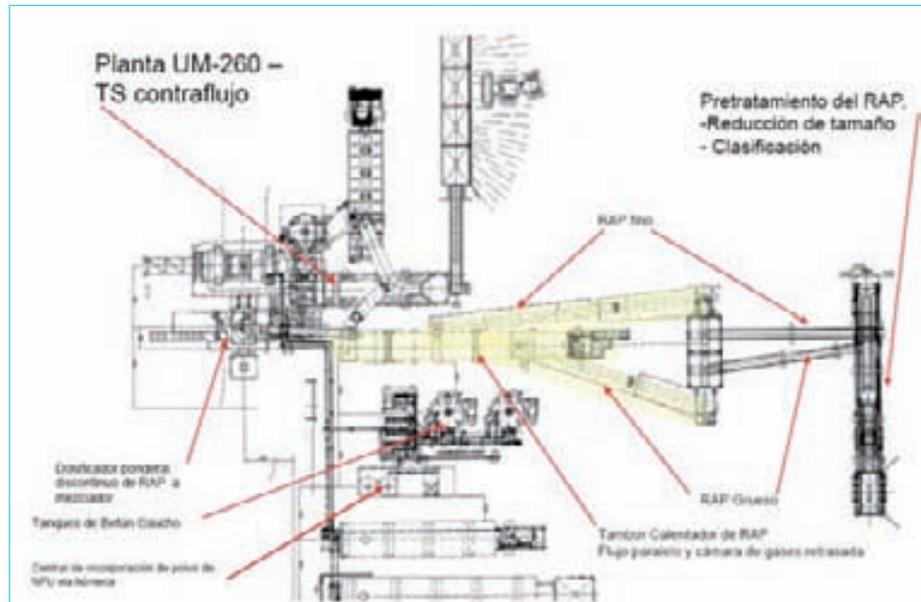


Figura 4. Planta de la disposición de elementos de la instalación.

EXPERIMENTACIÓN A ESCALA REAL

Los buenos resultados obtenidos en los estudios de mezclas y pruebas realizadas con el equipo de fabricación adaptado, descritos en los apartados precedentes, indicaban la conveniencia de pasar ya a la fase de experimentar con estas mezclas en tramos en servicio y poder evaluar así su comportamiento ante ciclos climáticos y tráfico real.

Se decidió proponer aplicar la mezcla descrita en el apartado 3.3, con emulsión con betún base 50/70, en sendos tramos experimentales.

1. Tramo experimental en la autovía A1 (Burgos)

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

La mezcla, ha sido extendida como capa intermedia en un tramo experimental ubicado en una vía de servicio de la referida Autovía, con una longitud de 1.300 m, y con categoría de tráfico T2. Como no existe aún normativa que indique en qué capas se puede aplicar reciclado templado, se ha querido ser conservador y se ha aplicado el reciclado templado como capa intermedia, como reposición de un fresado de 5 cm. del firme existente, con posterior extensión de una capa de rodadura con mezcla bituminosa convencional.



Foto 2. Aplicación en capa intermedia. Termografía de mezcla a salida de regla.

Previa ejecución del tramo, se procedió a la realización de un tramo de prueba, en el que se terminaron de ajustar todos los parámetros de la mezcla y proceso de aplicación.

El Centro Tecnológico de Repsol, realizó la evaluación de las mezclas fabricadas.

Se evaluaron muestras de material fresado todo uno, material fresado seleccionado en fracciones 0/5 mm y 5/25 mm, mezcla reciclada templada y testigos extraídos del tramo experimental.

Material fresado

El RAP correspondía a fresados de capas de rodadura de la autovía, tramificados para asegurar su homogeneidad y cumplimiento de tolerancias de composición. Se estudia el material fresado disponible en planta durante los dos días de fabricación para el tramo experimental, correspondiente al material en bruto procedente del fresado y a las fracciones 0/5mm y 5/25 mm. Los promedios granulométricos muestran materiales homogéneos en las tres fracciones estudiadas.

Mezcla reciclada templada a tasa total

Los resultados que se recogen en el estudio de laboratorio en cuanto a curvas granulométricas conseguidas en la mezcla, reflejan una dosificación sobresaliente de las fracciones de fresado en la planta de fabricación, siendo así también en la dosificación de la emulsión bituminosa, quedando reflejado en los contenidos de ligante final conseguidos en las mezclas recicladas:

La caracterización del ligante recuperado en dichas mezclas es:

Sensibilidad al agua

Los datos obtenidos en el ensayo de Sensibilidad al Agua de probetas fabricadas con la mezcla reciclada templada, según Norma UNE-EN 12697-12, arrojan resultados sobresalientes de resistencia conservada, aunque el contenido de huecos en mezcla se sitúa en el rango de 2,6% a 2,8%, quedando una mezcla muy cerrada.

Ensayo de rodadura

Los datos obtenidos en el ensayo de Rodadura, según Norma UNE-EN 12697-22, arrojan resultados de pendiente de deformación en pista superiores a 0,1 mm/103 ciclos, aunque cuando se trata de la mezcla reciclada con una adición de emulsión bituminosa del 2,5%, el resultado se acerca mucho a ese punto de referencia:

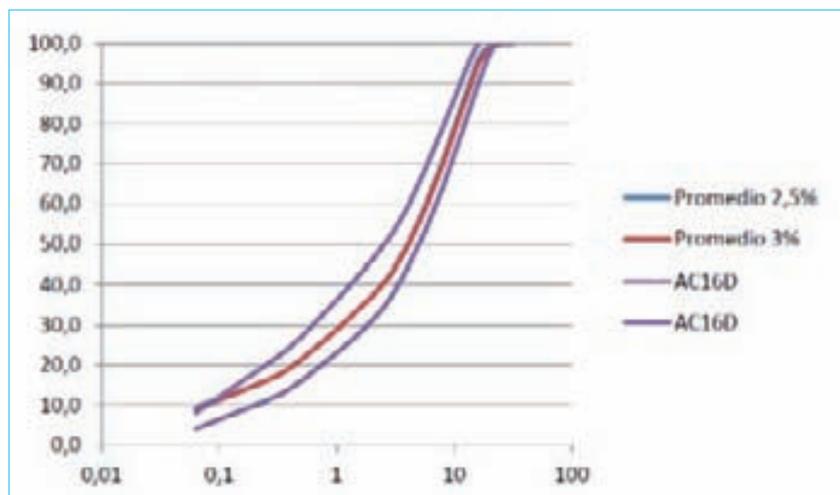


Figura 5. Curvas granulométricas.

CONTENIDO DE LIGANTE SOLUBLE/MEZCLA	MRT 2,5% 25.06.2012	MRT 3% 25.06.2012	MRT 2,5% 26.06.2012	MRT 3% 26.06.2012	MRT 2,5% Promedio	MRT 3% Promedio
% LIGANTE S/A	6.14	6.28	5.57	6.09	5.85±0.29	6.19±0.1

Tabla 4. Contenido de ligante.

ENSAYO	MRT 2,5% 25.06.2012	MRT 3% 25.06.2012	MRT 2,5% 26.06.2012	MRT 3% 26.06.2012
PENETRACIÓN, 25 °C, 0.1 MM.	20	23	15	17
PUNTO REBLANDECIMIENTO, °C.	66.6	64.0	74.5	69.2

Tabla 5 Caracterización del ligante.

RESULTADOS/MEZCLA	MRT 2,5% 25.06.2012	MRT 3% 25.06.2012	MRT 2,5% 26.06.2012	MRT 3% 26.06.2012
DENSIDAD GEOMÉTRICA, G/CM ³ .	2.334	2.314	2.348	2.334
DENSIDAD S.S.S., G/CM ³ .	2.374	2.368	2.374	2.365
% HUECOS MEZCLA, %VM.	2.3	2.2	2.3	2.3
MÓDULO RIGIDEZ 20 °C, MPA.	5839	5604	5368	5053
RESISTENCIA TRACCIÓN INDIRECTA SECO, MPA.	3.1	3.0	2.8	2.7
RESISTENCIA TRACCIÓN INDIRECTA HÚMEDO, MPA.	2.8	2.8	2.6	2.7
RESISTENCIA CONSERVADA, %.	92.6	93.7	92.0	99.3

Tabla 6. Sensibilidad al agua.

RESULTADOS/MEZCLA	MRT 2,5% Promedio	MRT 3% Promedio
PENDIENTE DE DEFORMACIÓN EN PISTA, WTS AIRE	0,130 mm/10 3 ciclos	0,233 mm/10 3 ciclos
DENSIDAD APARENTE PLACAS PISTA (% HUECOS MEZCLA)	2.361 g/cm ³ (2,9% VM)	2.350 g/cm ³ (3,2% VM)
PROFUNDIDAD DE LA RODERA A LOS 10000 CICLOS	3.47 mm	5.08 mm

Tabla 7. Ensayo de rodadura.

RESULTADOS/TESTIGO PROMEDIO	2.5 %	3.0 %
ALTURA, MM.	53.6	55.2
DENSIDAD S.S.S., G/CM ³ .	2.309	2.250
% HUECOS MEZCLA, %VM.	5.2	7.4
MÓDULO RIGIDEZ 20 °C, MPA	4758	3431
RESISTENCIA TRACCIÓN INDIRECTA SECO, MPA.	2.64	2.29
RESISTENCIA TRACCIÓN INDIRECTA HÚMEDO, MPA.	2.38	2.16
% RC	90.2	94

Tabla 8. Ensayo de testigos.

Ensayos de testigos de obra

Los resultados obtenidos de los ensayos realizados sobre testigos extraídos de obra y correspondientes a los dos días de trabajo en el tramo experimental, 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 es algo superior al obtenido en la Fórmula de Trabajo. Los testigos correspondientes al contenido de emulsión del 3,0% arrojan datos algo inferiores en cuanto a Módulo de Rigidez y

PROMEDIO	2.5 %
ALTURA, MM.	50.2
DENSIDAD S.S.S., G/CM3.	2.193
% HUECOS MEZCLA, %VM.	9.6
MÓDULO RIGIDEZ 20 °C, MPA	2587
RESISTENCIA TRACCIÓN INDIRECTA SECO, MPA.	1.21
RESISTENCIA TRACCIÓN INDIRECTA HÚMEDO, MPA.	1.34
% RC	110.7

Tabla 9. Sensibilidad al agua.

Tracción Indirecta, siendo algo superior, como resulta lógico, la Sensibilidad al Agua.

2. Tramo experimental en la autovía A-231 (Palencia)

Posteriormente al tramo realizado en Burgos, a finales de Agosto, se procedió a realizar el segundo tramo experimental, con la misma mezcla antes reseñada y con la dosificación de 2.5% de emulsión, 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 resumen a continuación los ensayos de control de calidad de la Mezcla Asfáltica Reciclada Templada a Tasa Total con Emulsión Bituminosa, aplicada en el tramo experimental en carril de tráfico rápido de la autovía A-231, en el término de Osorno (Palencia).

Ensayos sobre testigos de obra

Los resultados obtenidos de los ensayos realizados sobre testigos extraídos arrojan resultados aceptables en cuanto a Sensibilidad al Agua, con un contenido de Huecos en Mezcla superior al obtenido en la Fórmula de Trabajo. En cuanto a ensayos de Módulo de Rigidez y Tracción Indirecta, los datos son inferiores a los esperados.

CONCLUSIONES

El desarrollo de las mezclas recicladas templadas a tasa total con emulsión bituminosas, significan una apuesta decidida por el aprovechamiento de los materiales y la reducción de temperaturas de fabricación y aplicación de las mezclas bituminosas.

En el presente artículo, se ha propuesto una metodología específica de diseño en laboratorio de mezclas recicladas



Foto 3. Testigo de obra con MTRTE a tasa total.

templadas a tasa total, debido a que los métodos tradicionales no responden adecuadamente a su diseño, por la naturaleza de los materiales 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 el ligante del mismo.

La ejecución de estas mezclas, no lleva asociada diferencias significativas, respecto a la ejecución de mezclas bituminosas en caliente.

Los tramos experimentales realizados, a fecha de redacción del presente artículo, han presentado un buen comportamiento, sin aparición de deformaciones en ambos tramos.

Sería deseable la consideración de este tipo de mezclas en capa de rodadura, al menos en aquellas vías que permitan por tráfico el empleo de las mezclas tipo AC en capa de rodadura, según la legislación vigente, en la realización de nuevos tramos experimentales, que permitan seguir conociendo esta novedosa tecnología.

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 4 años:

- 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.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- I. Dirección General de Carreteras, M^o Fomento: "Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes" PG-3. 2004.
- II. Dirección General de Carreteras, M^o Fomento: Norma 6.3-I.C. "Rehabilitación de firmes" 28 de Noviembre, 2003.
- III. Dirección General de Carreteras, M^o Fomento: "Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de conservación de carreteras" PG-4. 18 de enero de 2002.
- IV. García Santiago, J.L., Guisado Mateo, F. "Rehabilitación sostenible de pavimentos" 6^o Congreso de Ingeniería Civil de Valencia, 2011.
- V. 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.
- VI. García Santiago, J.L., "Reutilización y reciclado de materiales en la conservación de firmes" Jornada Técnica ACEX. Vitoria, 2011.
- VII. 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.
- VIII. González Arias, Julio "Refuerzo de Firmes con mezclas bituminosas experimentales" Proyecto TRACC, Toulouse, 2011.
- IX. Páez Dueñas, A et al. "Reciclado en frío in situ de Altas prestaciones. Experiencias y resultados." Congreso de Firmes, Valladolid, 2008.
- X. Soto, J.A., Colas, M^a del Mar, Lucas, F.J., Torres, S. "Mezclas Bituminosas adaptadas al cambio climático" Valladolid, 2010. 



Actuaciones con lechadas bituminosas en capas superiores de pistas de vuelo de aeropuertos



Pablo Raul GARCÍA BARTOLOMÉ

Fernando AGUIRRE MUÑOZ DE MORALES

AENA. Dirección de Proyectos
 Jefe División de Obra Civil
 Infraestructuras CONELSAN
 Director Técnico

RESUMEN

Para el cumplimiento de la Normativa Internacional en una pista de vuelo, al respecto de las características que se deben exigir a la capa superior o de rodadura (en especial el coeficiente de rozamiento y la textura superficial), hay que realizar una serie de medidas a raíz de las cuales se pueden o no derivar actuaciones para su corrección. Además, el pavimento de cualquier infraestructura se calcula para un periodo de vida de entre 15 y 20 años, periodo en el cual las características superficiales se ven seriamente afectadas por las solicitaciones, clima y oscilaciones térmicas, rayos solares que afectan al envejecimiento, actuaciones de limpieza de caucho, etc. Ello obliga a actuar en las capas de rodadura en periodos más cortos.

En los últimos tiempos ha habido dos factores que han modificado en gran parte todas las actuaciones llevadas hasta el momento: el desarrollo de nuevos productos y el gran aumento del tráfico aéreo. Este artículo trata dos soluciones aplicadas en los aeropuertos de España (mezclas discontinuas y lechadas) y de su seguimiento en el que se observó la ejecución de las obras y la acción del paso del tiempo en los tratamientos aplicados. Todo ello con el objeto de poder tener una pauta a seguir, dependiendo de las características de cada aeropuerto: Número de aeronaves, tipo y características de las mismas, tipo de tráfico (estacional o continuo), materiales (áridos y ligantes) en la zona, insularidad o doble insularidad. Se pone especial énfasis en la aplicación de las lechadas bituminosas específicas.

Palabras clave: Lechadas bituminosas, Aeropuertos, Pistas de vuelo

INTRODUCCIÓN

En las pistas de vuelo de los aeropuertos una de las características que más importancia tiene desde el punto de vista de la seguridad en las operaciones, es el coeficiente de rozamiento de la superficie. La aparición de aeronaves de gran capacidad, con velocidades de operación elevadas y que necesitan pistas de mucha longitud, han hecho crítica la eficacia del frenado mecánico mediante los neumáticos del tren de aterrizaje, que depende del coeficiente de rozamiento.

Este parámetro es función de la rugosidad de la superficie, de su humedad y de su limpieza, especialmente de la acumulación de caucho y/o de grasas. Sus valores están determinados por el organismo internacional OACI (Organización Internacional de Aviación Civil) tanto para pista seca como para pista mojada. Un coeficiente bajo puede obligar a la autoridad aeroportuaria a limitar las masas operativas de los aviones, a tener que prolongar las longitudes de pista para conseguir la necesaria seguridad o incluso a cerrar la pista. Muchos incidentes en los que las aeronaves se salen de las pistas tienen como causa coeficientes de rozamiento reducidos, produciéndose el efecto llamado "aquaplaning".

Aunque suele darse con mayor frecuencia en una pista ya usada, un coeficiente de rozamiento menor de lo exigido por la autoridad aeronáutica puede darse en una capa superior después de un recrecido o en una pista de nueva construcción, debido a una incorrecta elección de la última capa del pavimento, la mala calidad de los áridos, una incorrecta puesta en obra, etc.

OACI reconoce en su anejo 14 que para alcanzar el mínimo en la textura superficial media, de una superficie nueva (1 mm) "requiere por lo general alguna forma especial de tratamiento de la superficie" y cita granallados o ranurados perfectamente definidos, pero en ambos casos con su costo adicional, relativamente alto, al propio del tratamiento. Hay administraciones como la holandesa que son más restrictivas, y que indican que una superficie de hormigón asfáltico sin ningún tipo de tratamiento no cumple los requisitos primarios de rozamiento y textura, ni previene de los riesgos del aquaplaning y por ello "importa" tratamientos con áridos de alto Coeficiente de Pulimento Acelerado (CPA) de donde los hay más próximos (en este caso de Alemania).

CONDICIONANTES PARA LA ELECCIÓN DEL TRATAMIENTO A EMPLEAR

Los pasos previos a la hora de decidir una inversión dedicada a la adecuación de una pista de vuelo consisten en la toma de datos de la misma. Si el

pavimento es suficientemente resistente (número de clasificación del pavimento, PCN) se evitan recrecidos del pavimento y se procede a la evaluación del coeficiente de rozamiento (con varios procedimientos de medida: mumeter, deslizómetro, etc) y de la textura superficial, medida por el procedimiento de mancha de grasa o círculo de arena, en varios tramos a lo largo de la pista. Esto nos indicará si hay que actuar en toda o en parte de la pista, en cuanto ancho, longitud, etc.

Una vez conocidos estos datos básicos, entran en juego los condicionantes que harán que el proyectista se incline dentro de un abanico de posibles soluciones. Estos condicionantes pueden ser de varios tipos:

- **Geográficos:** Una parte importante de los aeropuertos españoles son insulares. La insularidad lleva consigo una menor disposición de áridos de calidad, el traslado de betunes o aditivos, que llevan a la pérdida de la calidad de dichos productos. La carencia de áridos de alto CPA en las Islas Baleares es un ejemplo de dificultad para lograr las capas superiores con un rozamiento adecuado.
- **Climatológicos:** Estos aspectos condicionan más el tipo de solución por sus características físico químicas. Un tratamiento en frío necesita un mínimo de tiempo para lograr la mínima cohesión para soportar el tráfico aéreo (rotura y curado del tratamiento y su emulsión). A la vez, una capa de mezcla bituminosa en caliente requiere que la temperatura ambiente en el extendido esté por encima de los mínimos especificados, difíciles de cumplir en los inviernos.
- **Aeroportuarios:** Son aquellos que se derivan por realizar las obras en el ámbito de un aeropuerto, y que gran parte de ellos no se dan en otras infraestructuras. En este apartado se puede incluir:
 - **Operacionales:** desde el tipo de avión (que puede condicionar el ancho y longitud del tratamiento), el tipo de tráfico (si es estacional o se reparte equitativamente a lo largo del año, lo que puede permitir el cierre o no de la pista; si es diurno, con lo que podremos cerrar la pista por la noche), el tráfico como dato (si es muy alto, habrá más depósitos de caucho de las tomas, que habrá que limpiar más a menudo).
 - **Infraestructura:** La existencia de una infraestructura alternativa (otro aeropuerto cerca, otra pista de vuelo en el propio, una calle de rodaje que se pueda utilizar como pista de vuelo).

- Económicos: Una inversión que se considera apta para un aeropuerto, puede considerarse exagerada para otro, interviniendo todos los factores.

SOLUCIÓN CON MEZCLAS BITUMINOSAS DISCONTINUAS

Durante muchos años, a la hora de realizar un recrecido de pista de vuelo se optaba por diseñar la capa de rodadura con una mezcla de granulometría similar a la de la F.A.A. americana de $\frac{3}{4}$ de pulgada. Pero se vino observando que en pista nueva no se cumplían satisfactoriamente todos los requisitos mínimos de rozamiento y textura superficial. Por ello se propuso al laboratorio el estudio de una solución con la combinación de áridos de granulometría discontinua y un ligante a base de betún modificado con polímeros o con fibras y betunes normales o modificados. Estas mezclas bituminosas discontinuas (MBD) ya eran usadas en carreteras, pero de comportamiento desconocido en pistas de vuelo. Este sistema tiene la ventaja que la mezcla puede prepararse en las mismas plantas que las mezclas normales y los mismos equipos de puesta en obra aunque para una mejor aplicación se procura el empleo de maquinas extendedoras con rampa de riego de emulsión incorporada a la propia extendidora. La emulsión empleada en el riego de adherencia será emulsión catiónica de rotura rápida con residuo a base de ligante modificado con elastómeros o látices y más recientemente se viene empleando las denominadas termoadherentes (betunes muy duros). El espesor de capa de MBD recomendado se encuentra entre 3 y 4 cm.

Los resultados de los ensayos tanto en los tramos a escala de laboratorio como tras su puesta en obra a escala industrial (calles de rodaje en una primer fase), han sido por lo general satisfactorios, alcanzando y superando los valores mínimos exigidos en los pliegos de prescripciones técnicas para rozamiento y textura y con ello obviar las operaciones de granallado o ranurado que citábamos anteriormente. Los inconvenientes han surgido en aquellas zonas donde se realizan grandes esfuerzos de torsión, ya sea cerca de las cabeceras de pista o en las proximidades de las calles de salida. En estos casos ha habido ocasionalmente, desprendimiento parcial de áridos, que han sido objeto de reparaciones puntuales.

Una variante de este tipo de aplicación es una mezcla bituminosa igualmente discontinua, pero con betún normal y con un aditivo compuesto por fibras de celulosa, con una longitud media de 1,1 mm y un grosor medio de 45 micras. En la fabricación de la mezcla lo que hay

que realizar es el añadido del aditivo que se pone en el mezclador. Económicamente los costes son similares a las MBD con betún modificado y aseguran una correctas y homogéneas características en la mezcla.

Las ventajas de la puesta en obra de las mezclas discontinuas, han sido determinantes a la hora de decantarse por esta solución en la mayoría de los casos:

- Es una mezcla bituminosa, que aunque especial, hay bastante experiencia en su puesta en obra.
- No necesita ningún tipo de maquinaria específica.
- Desde el punto de vista operacional, es una solución idónea ya que no obliga al cierre total del aeropuerto si se efectúa en horarios nocturnos. La capa recién colocada puede ser pisada en menos de una hora.
- El espesor de la capa (3.5 cm de media) hace que las cuñas fin de jornada no sean difíciles de ejecutar, ni traigan apareadas irregularidades posteriores.
- El menor esponjamiento de la capa por su concepción y espesor, disminuye los riesgos de irregularidades superficiales habiéndose constatado mejoras en el IRI muy importantes con aplicaciones de capa única.

Económicamente hablando, la tonelada de esta solución es más cara que la mezcla bituminosa normal (hasta dos veces su valor), pero no necesita ningún tratamiento posterior y el espesor de extendido es menor (3,5 cm frente a 6 cm) lo que la hace viable.

Aunque todavía no se puede hablar de un periodo de vida de este tratamiento (la primera pista de vuelo, Granada, se ejecutó en diciembre de 1.994), se estima que puede estar entre los 10 y 15 años para pista con un tráfico medio; pero su nivel de rozamiento y textura es todavía aceptable.

SOLUCIONES CON LECHADA BITUMINOSA

El sellado con lechada bituminosa trata de una solución con muy amplia experiencia a nivel mundial, sobre todo en aplicación en carreteras, ocupando España el segundo lugar en cuanto a volumen ejecutado siendo el primero en tecnología de este procedimiento. Se le puede denominar como mejora o renovación de las características superficiales de un pavimento. Además es un producto en el que la evolución de la técnica en cuanto a materiales y maquinaria de fabricación y empleo permite su aplicación en muchos tipos de pavi-

mento; el estado del arte actual está por la 5ª generación de lechadas. Al tratarse en una mezcla en frío que se fabrica in situ, con áridos, emulsión bituminosa, agua y aditivos, su fabricación y puesta en obra aunque relativamente sencilla precisa ser aplicada por especialistas. Tiene el problema de que la emulsión necesita romper (separación del agua con el ligante) y madurar (curado hasta lograr la cohesión mínima para soportar el tráfico), siendo ese periodo de rotura y curado de entre 1 y 12 horas en función de la tecnología aplicada. Las condiciones meteorológicas son muy importantes, ya que con un alto grado de humedad el sistema tardará más en curar, con lo que no se alcanzarán los efectos deseados. Además, al tratarse de una capa muy fina (3-6 mm), puede existir un gran desprendimiento de áridos, inconveniente añadido para las pistas de vuelo por su posible absorción por parte de los motores (FOD). Unidas las dos cosas, un mínimo de horas de cierre desde su extendido y la necesidad de usar grandes barredoras-aspiradoras, se originan los mayores problemas para la aplicación de este tratamiento que se superan gracias a la experiencia y nivel tecnológico tanto del fabricante de la emulsión como del contratista y equipos humanos en la puesta en obra (todos). Por los anteriores problemas ha sido una solución relativamente poco empleada en Aeropuertos.

La aparición de ligantes modificados ha permitido asegurar un mínimo desprendimiento de árido durante el curado del material, por lo que se pueden utilizar lechadas de mayor tamaño de árido, y por consiguiente, mejores características superficiales (mayor macro-textura superficial). Y es aquí donde surge el segundo gran problema: al tener mayor coeficiente de rozamiento y mayor textura superficial, los depósitos de caucho de las ruedas de los trenes de aterrizaje de los aviones son más abundantes. La pista se "mancha" más rápidamente y en mayor cantidad. Los servicios de mantenimiento deben actuar más a menudo, y hasta ahora no se ha encontrado ningún sistema para la eliminación del caucho que no sea destructivo (se está experimentando disolventes del caucho que no afecten al asfalto). Una solución está en volver a aplicar otra lechada en las zonas afectadas por la abrasión de la limpieza, pero los servicios de mantenimiento de los aeropuertos se resisten a necesitar actuaciones en corto plazo.

El problema del tiempo necesario para el curado se podría soslayar si la pista en la cual vamos a aplicar la lechada se encuentra cerrada al tráfico durante un periodo mínimo de dos o tres días después de su extendido. Así daríamos tiempo a la evaporación de todo el agua y curado, aún en zonas donde la humedad

del aire sea alta (cercanas al mar, por ejemplo). También podrían actuar las barredoras con mayor libertad y más repetidamente.

Las lechadas tienen a su favor el bajo coste económico (unos 3 a 5 € por m²) siendo su vida estimada en torno a los 5 años, aunque en la actualidad hay tratamientos en pistas de vuelo aplicados con más años. En los campos de vuelo existen además otras áreas en las que los técnicos no aplican con la profusión que deberían este sistema (por rapidez, economía y prestaciones), como son las calles de rodaje y salidas.

Existe una ventaja adicional, importantísima desde el punto de vista operacional y económica con la aplicación de las lechadas: con este procedimiento se evitan recridos del eje como sería necesario con capas de más de 1 cm. de espesor (poner a cota las balizas del eje de las pista, supone un coste adicional de más de la mitad de la lechada)

Desde 1.995 se ha vuelto a este sistema con los resultados aceptables tanto en textura como en rozamiento, todas efectuadas con la lechada bituminosa LB-3, fabricada con una emulsión ECL 2 con betún modificado con elastómeros siempre con ligante procedente de crudos asfálticos (en España de NYNAS porque sus betunes proceden de crudos de Venezuela), y con áridos de tipo ofítico o porfídico, según la zona y después de ser aprobado por el Director de la Obra. Las dotaciones medias son de 10 kg/m². Los requisitos mínimos que se piden son valores medios de mancha de grasa de 1 mm y de rozamiento de 0.72 MuN. Hay que señalar que salvo Bilbao, la mayoría fueron efectuadas en los meses de noviembre a febrero, con los inconvenientes que esto acarrea por humedad y temperaturas.

Los resultados de estas lechadas de alta calidad han sido muy positivos. El ejemplo de Málaga (más antiguo) es significativo. En este aeropuerto se cubrió la lechada de 1993 en febrero de 2000 (siete años después) para poner un nuevo eje y cabeceras, entre otras actuaciones. En esta obra del año 2000 se observó antes de poner una mezcla discontinua, un estado muy bueno de la lechada (que hubo que granallar para quitar el caucho y resistió perfectamente).

EXPERIENCIA EN PISTAS DE VUELO

En la siguiente tabla (Tabla 1) aparecen los aeropuertos que han sido tratados con lechadas en los últimos años en las pistas de vuelo:

AEROPUERTO	AÑO	TM	M ²
Málaga	1993	1.470	147.000
Bilbao	1995	914	103.700
Ibiza	1997	1.260	128.000
Palma (Pista sur)	1997	1.350	135.000
Torrejón	1997	2.830	147.000
Alicante	1998	1.000	99.000
Gerona	1999	1.296	144.000
Jerez	2000	740	55.200
Zaragoza 12L/30R (2 capas)	2003	3.000	156.000
Gran Canaria 03L/21R	2004	1.420	142.000
Barajas 15R/33L 2 Capas	2004	4.000	245.000
Alicante	2004	1.000	99.000
Barcelona 07R/25L 2 Capas	2004	3.760	235.000
Gran Canaria 03R/21L	2005	1.420	142.000
Menorca	2006	1.455	138.575
Zaragoza 12R/30L	2006	1.500	150.000
Almería	2007	1.700	170.000
Ciudad Real	2007	3.520	220.000
Sevilla	2008	2.000	192.000
Palma Norte	2009	540	54.000
Jerez	2009	1.030	103.000
Huesca	2009	170	17.000
Barajas 15L/33R 2 Capas	2010	3.100	250.000
Barcelona 02/20	2012	640	64.000

Tabla 1. Lista actualizada de las pistas de vuelo de aeropuertos tratados en España con Lechadas Bituminosas.

En todos los casos se han cumplido los requisitos que fija OACI en su anejo 14 para pistas nuevas:

0,72 MuN de rozamiento.

1 mm. de mancha de grasa o círculo de arena de textura.

CONCLUSIONES

El área de movimiento de aviones y fundamentalmente las pistas de vuelo tienen que presentar tres características principales además de la de resistencia a las cargas (Figura 1).

Una planimetría adecuada para evitar la formación de charcos y el daño a las aeronaves, durante las operaciones. En este sentido cualquier pavimento puede cumplirlo y su deterioro es paulatino debido al agotamiento del firme o pavimento, por el paso del tiempo y la acción de las cargas, el sol, las variaciones de temperatura, vertidos, etc. Es decir, es una característica previsible que no precisa actuaciones urgentes de forma general.

Una microtextura áspera para mantener el rozamiento por encima de los valores mínimos recomendados. Esta característica sí que es susceptible de modificarse en un instante; porque la cantidad de rozamiento puede pasar de suficiente con la pista seca a insuficiente con la pista mojada. Por ello se precisa que los áridos con que se fabrique el hormigón asfáltico tengan un buen (alto) coeficiente de pulimento y presenten al neumático de la aeronave una superficie áspera (rugosa tras su desgaste por el uso), para que el contacto se mantenga en húmedo a las altas velocidades con que se opera.

Una macrotextura gruesa para facilitar la salida del agua de lluvia por la pendiente a los márgenes. Esta característica intrínseca al tipo de pavimento es susceptible de deteriorarse con el paso del tiempo de forma paulatina. Los pavimentos asfálticos que presentan esta caracte-

rística tan importante (OACI recomendando un mínimo de 1 mm.), son los denominados gruesos (con problemas de cohesión), las lechadas bituminosas y los de tipo discontinuo. Los hormigones asfálticos clásicos cerrados pre-

cisan actuaciones complementarias, como los ranurados, etc. para lograr ese valor mínimo.

Por último indicar que las inversiones en las pistas son rentables dependiendo de su duración con las menores incidencias en la operatividad, y que pese a que una pista de vuelo puede durar lustros (hablar de centenares de años en la aviación y su contexto es aventurado), las características superficiales de las pistas hay que evaluarlas en periodos más cortos 1-5 años dependiendo de sus circunstancias y características. Cuando los valores de dicha evaluación precisan una toma de decisión para la renovación de las características de la superficie, los procedimientos de capas delgadas modernos están dando la respuesta técnica y económica con actuaciones rápidas compatibles con la menor incidencia posible en la operatividad del aeropuerto. La aplicación de una lechada en una pista de vuelo con garantía (que evita la reposición de las luces aeronáuticas con su ahorro), supone un reto de maquinaria especializada, de materiales (áridos y emulsión específica) y medios humanos para el cumplimiento de las características superficiales indicadas en el Anejo 14 de OACI. Es imprescindible igualmente una rigurosa planificación de la obra.

En la página siguiente aparece el organigrama de las actuaciones que se manejan para la toma de decisiones en pavimentar una pista de vuelo. 

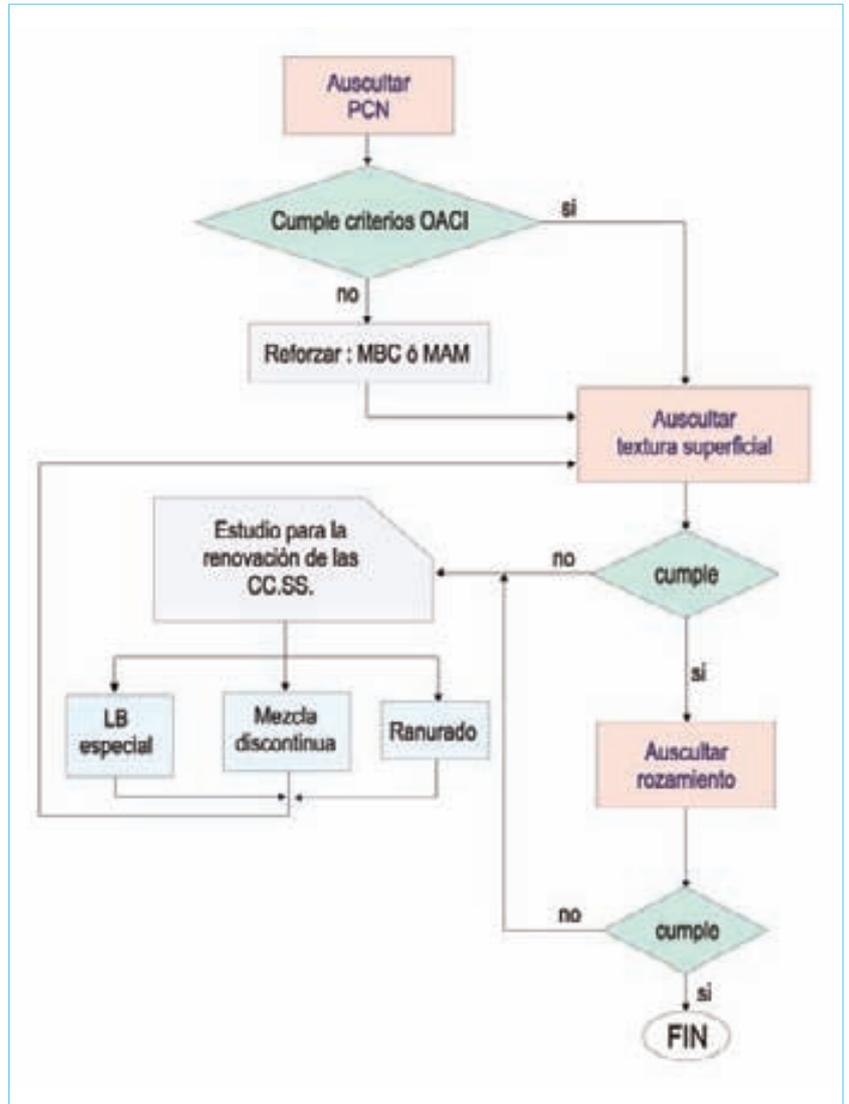
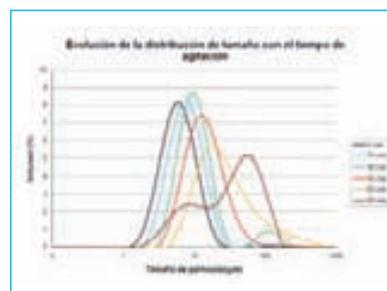


Figura 1.



Emulsiones bituminosas poliédricas



Nuria QUEROL SOLA

Sorigué

RESUMEN

Los factores más importantes relacionados con la fabricación de emulsiones altamente concentradas de betún en agua se discuten en este artículo. Las emulsiones preparadas fueron estabilizadas con un emulsionante catiónico puro y formuladas con la técnica HIPR (High Internal Phase Ratio). El efecto de la concentración final de betún, la temperatura de fabricación, así como la concentración de tensioactivo, el tiempo de mezclado necesarios o la velocidad de cizalla empleada o fueron estudiados. Los tamaños de glóbulo obtenidos demuestran que el tamaño medio obtenido está directamente relacionado con la velocidad de agitación, la concentración final de tensioactivo y el tiempo de mezclado. La estabilidad de la emulsión, que se puede medir con el aumento de tamaño de gota, se ve seriamente afectada con la concentración final del betún, la concentración de tensioactivo y del proceso de fabricación, así como de la velocidad y del tiempo utilizados en la fabricación.

Palabras clave: Emulsiones concentradas, Tamaño medio de gota, Estabilidad almacenamiento, Mezclas templadas

INTRODUCCIÓN

Las emulsiones son sistemas dispersos, constituidos por dos líquidos inmiscibles, uno de ellos es la fase continua, la cual contiene al otro líquido o fase interna, disperso en forma de pequeñas gotas. Estos sistemas son termodinámicamente inestables y poseen cierta estabilidad cinética⁽¹⁾ conferida por la presencia de un surfactante adsorbido a la interfase aceite/agua, el cual por ser capaz de disminuir la tensión interfacial, facilita también la dispersión de un líquido en el otro.

El cambio de energía libre (ΔG (f)) durante el proceso de formación de una emulsión⁽²⁾, viene dado por:

$$\Delta G_{(f)} = \sigma \Delta A - T \Delta S_{(conf)} \quad (\text{eq.1})$$

Donde:

σ : es la tensión interfacial

ΔA : el incremento de área interfacial

T: la temperatura absoluta

$\Delta S_{(conf)}$: el cambio de entropía conformacional del sistema.

El primer término del lado derecho de la ecuación 1 ($\sigma \Delta A$), representa el trabajo que debe suministrarse al sistema para expandir la interface durante la emulsificación. Esto significa que la energía que debe suministrarse al sistema para crear una determinada área interfacial, es menor mientras menor sea σ . Así, la presencia de un surfactante en la formulación, el cual reduce substancialmente el valor de σ , facilita considerablemente el proceso de formación de una emulsión.

El término $T \Delta S_{(conf)}$ de la ecuación 1, representa el aumento de entropía como resultado de la dispersión de un componente en un gran número de gotas, dicho término es positivo y promueve la emulsificación.

Para el caso de las macroemulsiones (diámetro de gotas mayor a 1 micra) $\sigma \Delta A > T \Delta S_{(conf)}$, por lo cual ΔG (f) > 0 (ecuación 1), lo que significa que el proceso de emulsificación es un proceso no espontáneo. Por consiguiente, las emulsiones son sistemas termodinámicamente inestables, y su estabilidad es determinada por efectos cinéticos.

Las emulsiones altamente concentradas se caracterizan por poseer fracciones de volúmenes de fase dispersa mayores que 0,74, que corresponde al máximo empaquetamiento de esferas monodispersas. Por lo tanto las gotas dispersas están muy cerca unas de otras, separadas por una película muy fina de fase continua, formada en cada punto donde las gotas se tocan⁽³⁾:

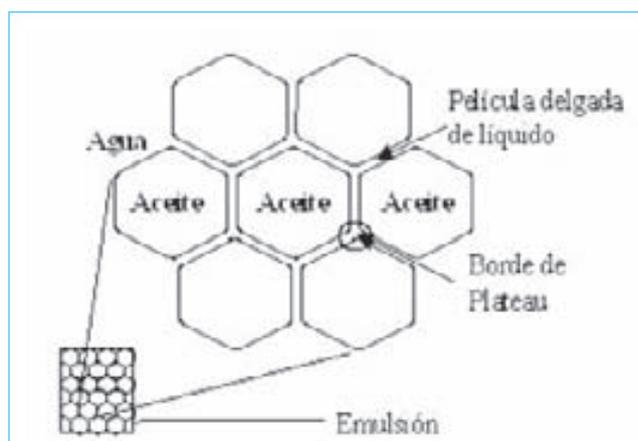


Figura 1. Estructura poliédrica de una emulsión concentrada.

Cada película interfacial, está sometida a una presión de compresión, la cual es contrarrestada por una presión de desunión⁽⁴⁾, generada dentro de la película interfacial, debido a la existencia de fuerzas de atracción de Van der Waals, de fuerzas de repulsión electrostáticas. Del equilibrio entre estas fuerzas depende la estabilidad de una emulsión⁽⁵⁾. La presencia de una monocapa de surfactante adsorbida sobre la superficie de las gotas dispersas en la emulsión, es responsable por conferir una magnitud adecuada a la presión de desunión y así preservar la estabilidad y las otras propiedades de estos sistemas.

En emulsiones, es de fundamental importancia controlar la estabilidad y las propiedades reológicas durante el proceso de formación y posteriormente durante el almacenamiento y el transporte. Mediante un control cuidadoso de la naturaleza y magnitud de las fuerzas de interacción entre gotas, es posible controlar las propiedades de estos sistemas.

La estabilidad de una emulsión puede medirse determinando el tiempo que transcurre entre su formación y la separación completa de las fases.

Idealmente, las emulsiones concentradas (con más de 70% de fase interna) consisten de una aglomeración de gotas poliédricas separadas por una película muy fina de fase continua (Figura 1). Tres películas interfaciales convergen en el borde de Plateau. La curvatura de la superficie de la gota en el borde de Plateau, genera una diferencia de presión entre la película líquida interfacial y el borde de Plateau, originando un flujo de fase continua desde la película líquida interfacial hacia los bordes de Plateau. De esta forma, la película líquida interfacial se hace cada vez más delgada con el tiempo, pudiendo eventualmente romperse, en cuyo momento la emulsión se desestabiliza. Así, la estabilidad de una emulsión depende de la estabilidad de la película líquida interfacial, la cual a su vez depende de la presión de desunión⁽⁶⁾. La

presión de desunión es una presión hidrostática en el interior de la película líquida interfacial, que actúa perpendicular a la superficie de las gotas. Esta presión se opone al contacto entre las gotas y por consiguiente a su coalescencia. En otras palabras, la presión de desunión es una fuerza por unidad de área, que se opone al drenaje de la fase continua contenida en la película líquida interfacial.

Las principales fuerzas que actuando dentro de la película líquida interfacial, contribuyen significativamente con la presión de desunión, son las fuerzas de London, Van der Waals, las fuerzas de repulsión electrostática^(vi).

Las emulsiones concentradas tienen muchísimas aplicaciones industriales. En este artículo, se discuten algunos aspectos relacionados con los procesos de formación y estabilidad de emulsiones de betún en agua y su posible aplicación en mezclas templadas.

MATERIALES Y MÉTODOS

1 Preparación de emulsiones

El método utilizado para la preparación de las emulsiones concentradas es el HIPR (High Internal Phase Ratio). Este método requiere que la dispersión inicial se lleve a cabo a fracciones de fase interna superiores a la del empaquetamiento crítico, 74%. Esto facilita la formación de emulsiones con una distribución de diámetro de gotas bastante estrecha y una concentración muy alta de betún residual, superior al 75%. De acuerdo con este método se pueden fabricar emulsiones controlando la morfología final de la emulsión.

El proceso de la HIPR se basa en los elementos siguientes:

- La emulsión se fabrica en régimen concentrado, es decir, con un contenido de fase dispersa entre el 75 y el 95 % (p/p).
- Se trabaja a una viscosidad alta para la fase dispersa, superior a 1 Pa.s.
- La velocidad de mezclado es baja, alrededor de los 1000 r/min. Se trabaja en inversión de fases.
- Una vez formada la emulsión se obtiene una pasta viscoelástica que se diluye en agua hasta obtener la relación betún/agua deseada.
- Las emulsiones se almacenan a la temperatura requerida.

CARACTERÍSTICAS	VALORES
Penetración	62 x 0.1 mm
Temperatura de reblandecimiento	51,3°C
Viscosidad a 100°C	4,80 Pa.s
Saturados	4,80 %
Aromáticos	45,29 %
Resinas	31,30 %
Asfaltenos	16,53 %

Tabla 1. Características fisicoquímicas del betún utilizado.

2 Materiales

Betún: Para este estudio se ha utilizado un betún tipo 50/70 cuyas características principales se muestran en la Tabla 1.

Tensioactivo: Las emulsiones concentradas se han formulado y estabilizado con surfactantes comerciales catiónicos de rotura media/rápida tipo alquil propilen diamina de cadena larga, preparadas a 70°C. Los surfactantes presentes en el betún se activan con soluciones ácidas de ácido clorhídrico a pH comprendidos entre 2.0-2.5.

3 Análisis granulométrico

Para evaluar la estabilidad de las emulsiones se ha realizado el análisis del tamaño medio de gota de las emulsiones almacenadas a 45°C durante diferentes tiempos. Para ello ha sido necesario utilizar un instrumento basado

PARÁMETRO	UNIDADES	RANGO
Velocidad rotación	r/min	800 - 1300
Temp. Betún	°C	95 - 100
Temp. Fase Acuosa	°C	50-70
Contenido de betún o		
Contenido de fase dispersa	p/p %	70-90
Penetración	0.1 mm	50/70
Concentración Tensioactivo	p/p %	0.15-2.0

Tabla 2. Parámetros utilizados en la formulación.

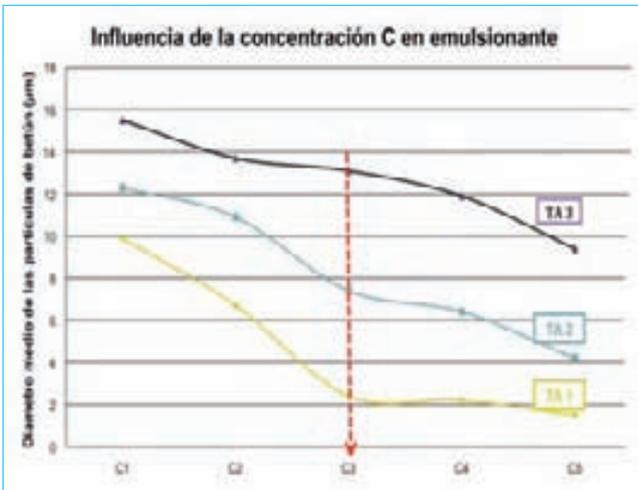


Gráfico 1. Influencia del tipo de amina y de su concentración en el diámetro medio de gota.

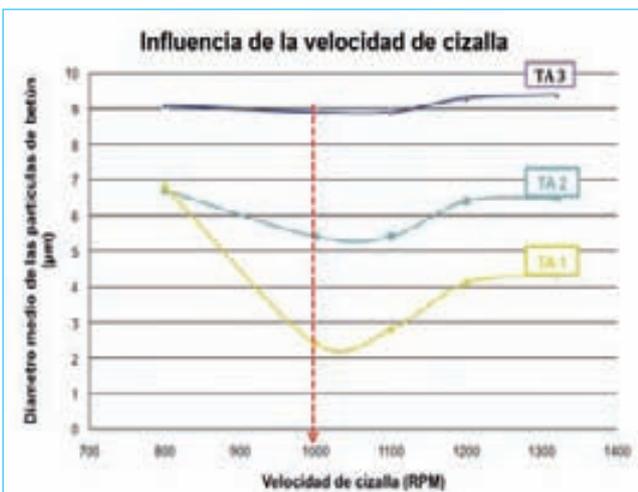


Gráfico 2. Influencia de la velocidad de cizalla en el diámetro medio de gota.

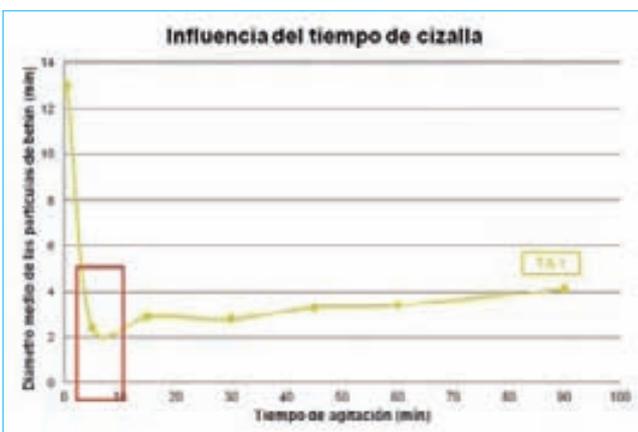


Gráfico 3. Influencia del tiempo de mezclado en el tamaño medio de gota.

en la técnica de difracción laser (Mastersizer 2000 de Malvern).

4. Parte experimental

Los parámetros relacionados en el proceso de fabricación se presentan en la Tabla 2.

Debido a la respectiva afinidad del tensioactivo activado por el betún y el agua, la energía empleada facilita la formación de emulsiones concentradas de aceite en agua.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El proceso de formación de emulsiones de bitumen en agua implica la creación de una extensa área interfacial. Para generar esta área interfacial es necesario disminuir la energía libre interfacial con la ayuda de un surfactante ^(VII) y de transferir energía mecánica al sistema, a través de un proceso adecuado de mezcla ^(VIII, IX). La distribución y el diámetro promedio de gotas de una emulsión dependen, entre otros factores, de variables de formulación, tales como la relación betún/agua, la concentración y el tipo de surfactante, el pH, la fuerza iónica de la fase acuosa, la temperatura y las variables mecánicas, tales como la velocidad y el tiempo de mezclado^(X).

En el Gráfico 1 se muestran los diámetros promedios de gota para una misma relación de betún/agua en emulsiones preparadas a 70°C con tres tipos de surfactantes diferentes: N-alkil amina, N-alkil poliamida y amidoaminas-imidazolinas en adelante: TA1, TA2 Y TA3. En el estudio se emplearon cinco concentraciones diferentes comprendidas entre : 0.4 – 2.0 % en peso.

Como se puede observar en el gráfico, existe una concentración máxima de tensioactivo a partir de la cual, por mucho que aumente no se es capaz de disminuir más el tamaño medio de gota. Si se quiere obtener un tamaño medio más pequeño, se debe modificar alguno de los otros parámetros comentados anteriormente.

Para una misma concentración de tensioactivo, C3, se obtiene el menor tamaño medio con el tensioactivo tipo TA1.

En el Gráfico 2 se representa la variación del diámetro promedio de gotas en función de la velocidad de mezclado, para emulsiones preparadas a 70°C con la concentración C3 anteriormente evaluada.

Para una determinada relación de betún/agua se obtiene un diámetro promedio de gota límite cuando la velocidad de mezclado aplicada es de 1000 r/min siendo el valor

óptimo cuando se aplica el tensoactivo tipo TA1 a concentración C3.

En el tiempo de mezclado se observa que este tipo de emulsiones requieren muy poco tiempo para obtener su tamaño medio óptimo, y que superado este tiempo, lejos de mejorar, el tamaño medio obtenido va aumentando poco a poco. En el Gráfico 3, se puede observar que el tamaño óptimo se obtiene con tan solo 5 minutos de agitación.

Se puede observar mejor esta tendencia a aumentar el tamaño medio de globo representando la distribución granulométrica en función del tiempo de agitación. Es este caso se aprecia bien el desplazamiento hacia los tamaños más grandes de la curva granulométrica a medida que el tiempo de agitación aumenta.

Por último se estudia la estabilidad en el tiempo de este tipo de emulsiones, por ser una característica muy importante a tener en cuenta.

La estabilidad de una emulsión se manifiesta a través de los cambios en algunas de las propiedades que la caracterizan con el tiempo de almacenamiento. Así, se puede determinar la estabilidad de una emulsión midiendo los cambios que sufre la distribución y el diámetro promedio de gotas durante el almacenamiento.

En el Gráfico 5 se muestran los diámetros promedio de gotas obtenidos en función del tiempo de almacenamiento, a 25°C, para una emulsión preparada con el tensoactivo tipo TA1 y almacenada durante 10 días.

No se observan variaciones en el diámetro promedio de gotas durante los 10 días de almacenamiento, lo que significa que no se produjo coalescencia (incremento del tamaño promedio), al menos durante este período de tiempo, y que por lo tanto las emulsiones se comportaron como sistemas estables durante estos 10 días.

CONCLUSIONES

- El proceso de emulsificación está directamente relacionado con el tipo y la concentración de tensoactivo utilizado, por la presencia de electrolitos, por la relación betún/agua y por el tiempo y la velocidad de mezclado entre otros factores.
- Para una concentración de tensoactivo fija, manteniendo constante el tiempo y la velocidad de mezclado, el diámetro promedio de glóbulo disminuye al incrementar la relación betún/agua.

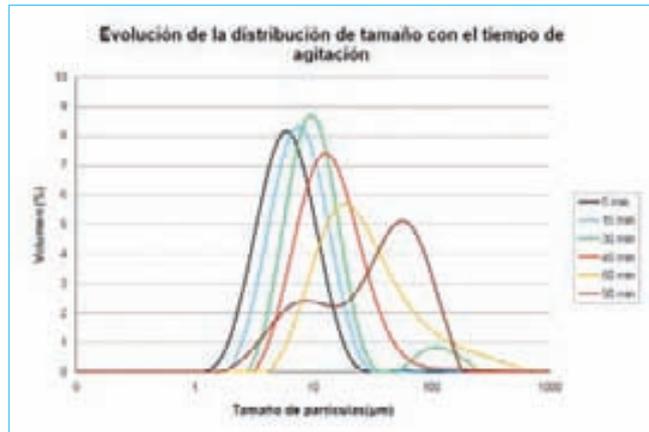


Gráfico 4. Evolución de la distribución del tamaño medio de partícula en función del tiempo de agitación.

- A mayor concentración de fase interna, más estrecha es la distribución de diámetro de gota, con lo cual la polidispersidad para este tipo de emulsiones disminuye.
- El diámetro promedio de gota y la distribución cambian de forma significativa pero uniforme con el tiempo y la velocidad de mezclado.
- Se puede pensar que para este tipo de emulsiones la formación del área interfacial tiene lugar de forma controlada lo que permite la producción de emulsiones con un determinado diámetro promedio de gota y una distribución bastante estrecha, con un alto grado de monodispersidad y por tanto de reproducibilidad en sus propiedades.
- La estabilidad de las emulsiones se ve afectada notablemente por el tipo y concentración de tensoactivo, ya que los factores pueden modificar la presión de desunión y la estabilidad de la película líquida interfacial.
- El futuro de estas emulsiones puede pasar por convertirse en excelentes ligantes para la formulación de

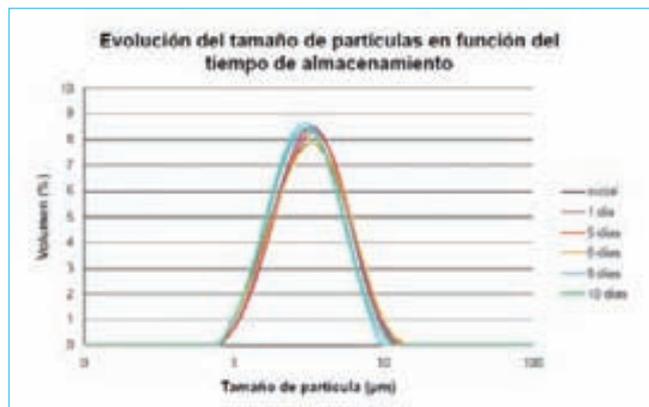


Gráfico 5. Evolución del tamaño medio de gota en función del tiempo de almacenamiento.

mezclas templadas pues al tratarse de emulsiones que tienen muy poca agua ésta se elimina casi en su totalidad durante el proceso de fabricación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- I. Kitchener, J. A. 1968. The Theory of Stability of Emulsions in Emulsion Science, P Sherman (ed.) Academic Press, London and New York, Chapter 2, pp. 77- 130.
- II. Princen, H. M. and Kiss, A. D.1986 Rheology of foams and highly concentrated emulsions. Static shear modulus. J.Colloid Inter. Sci. 112:427-437.
- III. Derjaguin, B. V. and Kussakov, M. 1937. Experimental studies of solvation of surfaces as applied to the mathematical theory of the stability of lyophilic colloids. Izv.AN SSR, ser. khim. 6:1119-1152.
- IV. Tadros, T. F. and Vincent, B. 1983. Emulsion Stability, In Encyclopedia of Emulsion Technology, Becher, P. ed. Marcel Dekker, New York, Volume 1, Chapter 3, pp. 1-56.
- V. Hunter, R. J. 1987. Foundations of Colloid Science, Oxford Science Publications, Clarendon Press, Oxford, Volume 1, pp. 168-440.
- VI. Israelachvili, J. 1991. Intermolecular and Surface Forces, Second Edition, Academic Press. London, pp. 139-307.
- VII. Tadros, T. F. and Vincent, B.1983. Emulsion Stability, In Encyclopedia of Emulsion Technology, Becher, P. ed.Marcel Dekker, New York, Volume 1, Chapter 3, pp. 1-56.
- VIII. Walstra, P. 1983. Formation of Emulsions. In Encyclopedia of Emulsion Technology, Becher, P. ed., Marcel Dekker, New York, Volume 1, Chapter 2, pp. 57-127.
- IX. Briceño, M. L., et al. 1989. Emulsion technology for the production and handling of extra-heavy crude oils and bitumen. Rev. Tec. Intevep 2:101-110
- X. Derjaguin, B. 1987 Theory of Stability of Colloids and Thin Liquid Films. Plenum Consultants Bureau, New York. Chapter 3, pp. 53 – 83.
- XI. Sheludko, A.1967. Thin liquid films. Adv. Colloid Interf. Sci. 1:391-464.
- XII. Rivas Hercillo, Gutierrez Xiomara, Silva Felix, Chirinos Manuel. 2003. Sobre emulsiones de betun en agua. Acta científica venezolana, 54; 216-236. 



El CEDEX, centro de estudios de referencia en el ámbito de carreteras



Mariano NAVAS GUTIÉRREZ

Director General Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX)

En el sector de las obras públicas y, más concretamente, en el de carreteras el esfuerzo de I+D+i recae tanto en el sector privado como en el sector público. Mientras que en el sector privado, el objetivo de innovación va focalizado primordialmente a fortalecer la competitividad de la empresa, a fin de aumentar su cartera de clientes, la vocación del sector público es la de universalizar los resultados del esfuerzo innovador, fortaleciendo la competitividad del país en su conjunto. Naturalmente, la integral de los esfuerzos innovadores del sector privado converge en ese mismo objetivo, más propio, en principio, del sector público. Además, hay que tener en cuenta las fórmulas de colaboración público-privada, en todas sus modalidades, con las que se han obtenido magníficos resultados en muchas ocasiones.

En España se dan, además, dos circunstancias que seguramente aparecen, también, en otros países con similar nivel de desarrollo.

La primera se refiere a los tiempos de maduración de una innovación. El sector privado se suele decantar por trabajos de innovación susceptibles de ser aplicados de forma inmediata, en coherencia con la exigencia lógica de presentar una cuenta de resultados anual saneada. El sector público, por el contrario, se puede permitir, en principio, conjugar mejor los tiempos de decisión política

– corto plazo – con los propios de cualquier investigación que refieren al corto/medio plazo.

La segunda hace referencia a la necesidad de disponer, para determinados trabajos de I+D+i, de equipos e instalaciones singulares de gran coste y de un personal científico-técnico muy especializado, para cuya formación se ha requerido muchos años y con gran fidelidad a esa especialidad. Ambos elementos, en general, no son asequibles para el sector privado y, en el caso de que no los asuma la Administración, el resultado sería la dependencia tecnológica del sector de las obras públicas y de su medio ambiente asociado de otro país en el que sí se haya apostado por la I+D+i.

Estas reflexiones, sin duda, debieron estar en la génesis del CEDEX, que es un organismo autónomo adscrito al Ministerio de Fomento de España, que depende, también funcionalmente, del Ministerio de Medio Ambiente, y que actúa como órgano público especializado en I+D+i en el sector de las obras públicas y del medio ambiente asociado, asumiendo, asimismo, las funciones de asesor técnico especializado de ambos Departamentos y con responsabilidades en el ámbito de la transferencia tecnológica.

Uno de los centros de los que se compone el CEDEX es el Centro de Estudios de Transporte (CET), cuyas actividades se pueden agrupar en las cinco áreas siguientes:

- Investigación y ensayo de materiales para carreteras: estabilización de suelos con aditivos; estudios de materiales básicos, áridos y ligantes bituminosos, estudios y ensayos de mezclas bituminosas y materiales conglomerados; aprovechamiento de residuos de carreteras; reciclado de capas de firmes, etc.
- Estudios de infraestructura viaria: Ensayo de firmes a escala real en la Pista de Ensayo Acelerado de Firmes del CEDEX; desarrollo y verificación de modelos de respuesta y comportamiento; evaluación de la capacidad estructural del firme; dimensionamiento de firmes y refuerzos; monitorización de tramos de ensayo, etc.
- Rehabilitación de firmes y sistemas de gestión: técnicas de rehabilitación; comportamiento del firme a largo plazo; inventario y banco de datos de carreteras; sistemas de gestión de firmes, etc.
- Características superficiales de pavimentos: evaluación y optimización de las características superficiales; regularidad superficial y confort de conducción; resistencia al deslizamiento de los firmes; macro-textura superficial; ruido de rodadura de los pavimentos, etc.
- Ingeniería de tráfico, señalización y seguridad vial: ingeniería de tráfico, señalización y seguridad vial; pesaje de vehículos en movimiento; instrumentación de la toma de datos de tráfico; gestión y regulación del tráfico; normalización de equipamientos viales y recomendaciones de proyecto; análisis para la mejora de la seguridad vial, etc.

Las antedichas actividades requieren disponer de equipos e instalaciones singulares, entre los que cabe destacar la "pista de ensayo acelerado de firmes a escala real", que consta de dos tramos paralelos de 75 metros de longitud, unidos por dos tramos semicirculares de 25 metros de radio interior. Los tramos indicados tienen un anchura de 8 metros y una profundidad de 2 metros, lo que permite que los firmes se construyan con procedimientos y maquinaria estándar de carreteras. La simulación del tráfico se efectúa mediante dos vehículos guiados, que permiten la aplicación de hasta dos millones de cargas al año (un millón al año por cada vehículo), las cuales se corresponden con las de un camión con la máxima carga legal.

Resultan igualmente destacables el "laboratorio de materiales de carreteras", que dispone de una gama completa de equipos para la dosificación, caracterización

y control de todos los tipos de mezclas bituminosas, así como para la caracterización de sus materiales constituyentes; el "laboratorio de fotometría para señalización vial", que dispone de una zona de medición formada por una cámara oscura de 20 metros de longitud, en donde se ubica el retrorreflectómetro y goniómetro y una zona de operaciones, en la que está instalada la unidad para el control, registro y procesado de datos; los equipos para la auscultación de carreteras (deflectómetros de impacto, georrádares, etc., para la evaluación de las características resistentes y estructurales; scrim, perfilómetros láser, etc., para la evaluación de las características funcionales; equipos CPX y SPB para la determinación del ruido de rodadura), etc.

Además del Centro de Estudios del Transporte, el CEDEX dispone de ocho centros más, que trabajan en red, lo que permite suministrar al cliente o usuario de servicios tecnológicos una respuesta integral. En concreto, dispone del Laboratorio de Geotecnia, igualmente dotado de equipos e instalaciones singulares, que complementan las capacidades del Centro de Estudios del Transporte en el ámbito de la ingeniería geológica y geotécnica, y del Laboratorio Central de Estructuras y Materiales, especializado en ensayos estáticos y dinámicos de puentes y en su inspección y auscultación.

Todas estas capacidades del CEDEX complementan las del sector privado y permiten, efectivamente, reafirmar la condición del CEDEX como centro de estudios de referencia en el ámbito de carreteras.

En cuanto a la colaboración ente los sectores público y privado, y en lo referente a carreteras, el CEDEX cuenta con una amplia e interesante experiencia que, a modo de conclusión, merece ser expuesta en esta presentación; consiste en haber compaginado los intereses de uno y otro sector a través de la participación en proyectos concretos de I+D+i. Esta experiencia nos impulsa a promover nuevas actuaciones de colaboración en las que el CEDEX aporte sus instalaciones singulares, como es el caso de la mencionada pista de ensayo acelerado de firmes, para probar y experimentar nuevos materiales y características de estos, propuestos por empresas generadoras de productos de diversa naturaleza, susceptibles de ser empleados por empresas constructoras de carreteras. Estimamos que estas líneas de investigación abren el camino hacia los materiales y técnicas de construcción y, en su caso, a la normativa que ha de regir en la construcción y conservación de las carreteras en un inmediato futuro. 

Un nuevo paradigma en la transferencia de tecnología en carreteras



Miguel Ángel DEL VAL MELÚS

Catedrático de Universidad
Universidad Politécnica de Madrid

En septiembre de 1997 tuve el honor de ser invitado por el Dr. Jorge Agnusdei y por el Ing. Jorge Tosticarelli a dar una conferencia en el marco del XII Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito que se celebró en Buenos Aires. El título de esa conferencia era “La experiencia española en transferencia de tecnología en carreteras”. En aquella ocasión empezaba señalando:

La transferencia de tecnología consiste básicamente en un trasvase de conocimiento entre los sectores productivos de dos países distintos, de manera que al cabo de un cierto tiempo, no demasiado largo, el sector productivo receptor se encuentre en condiciones de realizar sus propios desarrollos e incluso de que la transferencia pase a realizarse también en sentido contrario al inicial. No debe confundirse la transferencia de tecnología, que tiene en todo caso un profundo sentido económico ligado a los sectores productivos involucrados, con otras actuaciones que suelen resultar imprescindibles para la transferencia, pero que no constituyen por sí mismas esa transferencia.

Tras la introducción, la exposición se estructuraba en cinco apartados: condiciones para la transferencia de tecnología; cooperación entre administraciones públicas; intercambio de experiencias; acceso a la documentación y a la información; formación. Me doy cuenta ahora de que el texto, publicado unos pocos meses

después en la española *Revista de Obras Públicas*, carecía de conclusiones, no sé si porque lo había preparado con una cierta premura la semana anterior en la ciudad de Rosario, o porque la conferencia se acabó desarrollando, bajo la inteligente batuta del Ing. Lucio Cáceres, en un ambiente un tanto surrealista que todavía algunos recordarán.

Han pasado ya más de quince años, y los cambios tecnológicos y económicos que se han producido desde entonces han sido notables, aunque no todos ellos para bien. En aquel momento la globalización de la economía y el uso de Internet eran relativamente incipientes. Por otro lado, España experimentaba en ese momento un asombroso desarrollo de sus infraestructuras viarias; ahora, en cambio, países latinoamericanos como México, Costa Rica, Colombia, Brasil, Perú, Chile, etc., han tomado el relevo. Además, los centros tecnológicos se han multiplicado en toda América Latina, convirtiéndose algunos de ellos en referencias de primer orden, como hemos ido viendo en los sucesivos Congresos Iberoamericano del Asfalto.

En lo que se refiere a la transferencia de la tecnología, los cambios han sido, si cabe, más profundos, aunque algunos aún no los hayan percibido. La globalización afecta también, por supuesto, a estos procesos de transferencia e Internet se ha convertido en una herramienta gracias a la cual esos procesos pueden y deben llevarse a cabo de una manera diferente. Un cambio radical ya

está en marcha y, por eso, no es aventurado hablar de un nuevo paradigma.

Tradicionalmente, la transferencia de tecnología se desarrollaba en forma jerarquizada: desde un foco emisor, más o menos potente, se establecían flujos que llegaban a unos pocos receptores, que hacían de emisores secundarios e irradiaban a su vez a un mayor número de receptores de menor importancia que los anteriores. Este esquema se basaba en la existencia de estrechos y rígidos canales de formación y de información por los que se dosificaba cuidadosamente el “riego” hacia los niveles inferiores. Las posibilidades de fallo de un sistema en serie como éste eran lógicamente elevadas, por lo que la eficiencia de los procesos de transferencia resultaba limitada.

El orden descrito no se ha subvertido, pero sí ha cambiado. Como tantos otros procesos, los de transferencia tecnológica, incluyendo sin duda los de transferencia de la tecnología viaria, han evolucionado en estos últimos años hacia procesos en red. El sistema queda así formado por multitud de nodos, no todos iguales ciertamente, pero todos ellos interconectados, y que son tanto emisores como receptores. Los canales de formación y de información tienen capacidades superiores y, sobre todo, se han vuelto más flexibles. Un sistema de este tipo es más difícil de manipular y las probabilidades de fallo sistémico son menores, aunque en algún momento la conexión entre dos nodos concretos pudiera fallar. Y todo esto es posible gracias a internet, y en particular a lo que se ha dado en llamar la web 2.0, es decir, a la posibilidad de compartir conocimiento en entornos abiertos, interoperables y al servicio de los usuarios: blogs, wikis, redes sociales, multimediotecas, etc.

Los comités presididos por una personalidad nacional o internacional disminuyen su importancia frente a los debates en la red; los cursos selectos y restringidos retroceden frente a los MOOC (*Massive Open Online*

Courses); los salones de conferencias empiezan a ser sustituidos por las retransmisiones en *streaming*; los libros en los anaqueles conviven con los que hay en las nuevas bibliotecas virtuales. Dicho de otro modo: mientras hasta hace poco la información técnica era custodiada con celo por los que, fundamentalmente en su propio interés, actuaban como emisores en los procesos de transferencia tecnológica, de lo que se trata hoy es de poner toda la información en la red, a un precio asequible para todos o incluso gratuitamente. Y no sólo la información, sino también, de manera creciente, la formación.

Un condicionante nada desdeñable en la transferencia de tecnología es la lengua, como lo era también antes. Es evidente que el inglés es la *lingua franca* de la tecnología. Pero no debemos minusvalorar la potencia del español ni la del portugués. En nuestro ámbito, el español, el portugués y el inglés tienen que convivir en los flujos de formación y de información. El papel del español y del portugués crecerá en la medida en que nodos tradicionalmente receptores se conviertan también en emisores, aunque si se quiere trascender de nuestro propio ámbito, y ese es un objetivo perfectamente posible a medio plazo, hay que formar e informar también utilizando el inglés.

Otra cuestión sería la relativa a si existe o no en el ámbito latinoamericano un soporte para que el nuevo paradigma sea una realidad cotidiana. Un cierto soporte parece que se está configurando con carácter general, sin duda, aunque todavía son apreciables las resistencias por parte de quienes se sienten más a gusto con el modelo anterior. La existencia de nodos activos, y de flujos entre ellos, es ante todo una cuestión de voluntad, basada en el convencimiento de que el nuevo paradigma es notablemente más fructífero que el antiguo. Dicho de otro modo: no hay que tener miedo a poner a disposición de los demás la experiencia propia, más amplia o más restringida, ni de acercarse sin prejuicios a las de los demás. 



Colaboración entre España y Latinoamérica en investigación viaria



Félix Edmundo PÉREZ JIMÉNEZ

*Doctor Ingeniero de Caminos
UPC - Barcelona Tech*

Cuando me pidieron que escribiera esta tribuna sobre los trabajos y colaboraciones de investigación entre España y diferentes países de Latinoamérica, estaba preparando un artículo para esta revista sobre un nuevo procedimiento para evaluar el comportamiento mecánico de las mezclas bituminosas a través de su energía de fractura, ensayo Fénix. Al describir el estado del arte iba exponiendo cómo este procedimiento de ensayo era la última etapa, en este momento, de una línea de investigación iniciada cuando se montó el Laboratorio de Caminos de la UPC, y que su desarrollo era el fruto de la colaboración de diferentes alumnos de doctorando procedentes de Latinoamérica. Al tiempo que escribía el artículo, reflexionaba también en que en la mayoría de los trabajos de investigación realizados habían participado alumnos de Latinoamérica y que esta colaboración había sido muy provechosa, sobre todo, cuando los doctorandos eran ya personas experimentadas, que conocían la tecnología de su país y que aportaban sus conocimientos.

Recuerdo especialmente cuando aparecieron por Barcelona tres ingenieros de la Universidad de La Plata, Bianchetto, Nossetti y Daquerre, para hacer sus estudios de doctorado. Sus aportaciones sobre ensayos para la dosificación volumétrica del filler en el mástico, que no eran de uso en España y que se basaban en los estudios del ingeniero, también argentino, Celestino Ruiz, fueron muy útiles para plantear el estudio de másticos y el análisis del efecto de la cal en retardar el envejecimiento del betún. Ellos también conocieron los procedimientos que nosotros aplicábamos para caracterización de betunes asfálticos, método UCL, o la aplicación del ensayo de tracción indirecta al control de calidad -procedimiento puesto a punto en la tesis de Adriana Martínez, otra argentina

que se ha quedado de profesora en la UPC- y, cuando regresaron, los utilizaron y aplicaron en sus estudios y trabajos. Los resultados los expusimos en seminarios y conferencias que dimos conjuntamente, tanto en España y Argentina, como en los sucesivos congresos del CILA o del TRB en Washington.

Estos pensamientos eran satisfactorios, lo que no resultaba tanto fue comprobar la falta de sintonía entre las universidades y administraciones para que prestasen atención a nuestro esfuerzo, valorándolo, aceptándolo o dándole otra orientación si fuese necesario. Este esfuerzo de investigación que realizan las universidades muchas veces cae en saco roto por la falta de sintonía entre instituciones, administraciones, centros de investigación, etc. Aunque aquí cuento con más detalle lo ocurrido en esta colaboración de investigación entre la UPC y la Universidad de La Plata, he tenido similares experiencias con trabajos de otras universidades latinoamericanas: México, Colombia, etc.

Me gustaría hacer desde esta tribuna una llamada para que entre todos prestemos la atención y ayuda que merecen estos trabajos conjuntos de investigación, pues sin duda serán útiles tanto para las administraciones como para las universidades. Las administraciones de Carreteras cada vez disponen de menos laboratorios y centros de investigación propios, sin embargo, cada vez es más importante que sus técnicos tengan la máxima formación y conocimiento de las técnicas actuales y de las últimas tendencias e innovaciones. Van a ser ellos los que, de alguna manera, las van a ir incorporando a pliegos y proyectos. Por otra parte, la universidad necesita estas colaboraciones con las administraciones de Carreteras para hacer una investigación real, centrada, que dé solución a los problemas planteados y que, en definitiva, mejore la calidad y prestaciones de nuestras carreteras. 

RECOMENDACIONES DE REDACCIÓN Y PRESENTACIÓN DE LOS ARTÍCULOS PARA LA REVISTA CARRETERAS

1. En la primera página aparecerá el **título** del artículo, en **español e inglés**, nombre del autor, lugar de trabajo y cargo, así como dirección postal completa y de e-mail, y teléfono de contacto. Se recomienda añadir un **título reducido** (entre 30 y 35 caracteres -letras y espacios) para su inclusión en la portada de la revista.
2. Se incluirá, al comienzo del texto, el **resumen** del artículo, con una longitud máxima de 150 palabras, en **español y en inglés**. Además del resumen, se incluirán las **palabras clave** del trabajo, con un máximo de 5 (en caso de no recibirse, *Carreteras* se reserva la posibilidad de realizar y publicar un resumen propio^(*)).
3. Los nombres comerciales o marcas, de productos, no podrán incluirse en el título, ni los nombres de empresas en el título o en el resumen del artículo.
4. Se escribirá en DIN A4, con un interlineado de 1,5 y a doble espacio entre párrafos. La letra será Arial o Helvética, cuerpo 10. Las páginas estarán numeradas. Se respetará un margen aproximado de 2,5 cm por cada lado.
4. Es necesario incluir, al final del texto, las **referencias bibliográficas** (o, en su caso, bibliografía), que se numerarán mediante números romanos, tanto en dicha lista final, como en las referencias dentro del texto. Se recomienda también la inclusión de **conclusiones**.
5. Se recomienda, en la medida de lo posible, la **cita y referencia a otros artículos publicados en la Revista Carreteras**, con el propósito de mejorar el posicionamiento de la misma en el factor de impacto que publica el ISI Journal Citation Reports (JCR), una base de datos multidisciplinar producida por el Institute for Scientific Information (ISI) que permite determinar la importancia relativa de las revistas por área de conocimiento. Permite además conocer las revistas científicas de mayor impacto basándose en el análisis de las citas de los artículos que publican. Todos los artículos publicados en *Carreteras* desde el año 2003 están referenciados en la web de la Asociación Española de la Carretera (www.aecarretera.com), que cuenta con un potente buscador que facilita y agiliza la localización de trabajos técnicos introduciendo las palabras-clave correspondientes.
6. Es recomendable la inclusión de fotografías, tablas y figuras, con su pie explicativo correspondiente. Todo el material se reproducirá en **blanco y negro**.
7. Las fotografías se remitirán en formato **digital**^(**).
8. El artículo, con las condiciones anteriormente expuestas, tendrá una **extensión de referencia** de 15 páginas (mínimo 12 y máximo 18), incluyendo las fotografías, tablas y figuras que apoyen gráficamente el texto, además de la lista de referencias bibliográficas. Fuera de dicho intervalo, se estudiará una solución específica, que podrá incluir su revisión o su publicación en dos partes diferenciadas.
9. En el proceso de **selección de artículos**, tendrán preferencia aquéllos que sean **originales**, que no hayan sido publicados antes ni estén en proceso de revisión por otra publicación.

NORMAS PARA NÚMEROS ESPECIALES O MONOTEMÁTICOS DE CARRETERAS

1. Se respetarán, siempre que sea posible, las recomendaciones individuales anteriormente expuestas.
2. El número de artículos presentado para los especiales o monotemáticos, y el número de páginas por artículo, pueden variar, siempre y cuando no superen en total 145 páginas editadas sobre la base de las anteriores normas. Se recomienda un máximo de 8-9 artículos.
3. Se incluirá una presentación del número por parte del coordinador del mismo.

IMPORTANTE

- A. El texto del artículo o documentos a publicar se remitirá en soporte informático tipo **Word**.
- B. Las tablas y figuras se enviarán en un archivo informático independiente al del texto. Las figuras se adecuarán para su publicación en **blanco y negro**.
- C. Las **Fotografías** se remitirán en formato **digital** debiendo cumplir las siguientes condiciones:
 - Formatos .tif. o .jpg.
 - Resolución igual o mayor a 150 pixels/pulgada.
 - Tamaño nunca inferior a 10x15 cm.

(*) La razón de incluir estos resúmenes es aumentar la referencia a los artículos publicados por *Carreteras* en las bases de datos científicas internacionales.

(**) A menos que el autor exprese específicamente su desacuerdo, una vez publicadas, las fotos pasarán a engrosar el archivo fotográfico de *Carreteras*, que se reserva el derecho de su futura publicación en otros textos.

MENCIÓN DE LA REVISTA CARRETERAS EN BASES DE DATOS CIENTÍFICAS Y TÉCNICAS NACIONALES E INTERNACIONALES

La revista *Carreteras* aparece citada actualmente (tanto la propia cabecera como el resumen de los artículos técnicos que recoge) en distintas bases de datos científicas, tanto nacionales como internacionales. A saber:

Nacionales:

- Bases de Datos del Instituto de Estudios Documentales sobre Ciencia y Tecnología (IEDCYT) –antes CINDOC- del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC, www.csic.es).
- Base de Datos de Ciencia y Tecnología (ICYT).
- Catálogo Colectivo de los Fondos de las Bibliotecas del CSIC (CIRBIC).
- Base de Datos del Centro de Documentación del Transporte y las Comunicaciones del Ministerio de Fomento –www.fomento.es–.
- DIALNET, Base de Datos de Publicaciones Técnicas y Científicas de la Universidad de La Rioja.

Internacionales:

- Base de Datos DIIT (Documentación Internacional de Investigación del Transporte), gestionada dentro del Programa de Transporte de la OCDE.
- Base de Datos Ulrichs –www.ulrichsweb.com–.
- Engineering Index –www.ei.org–.
- Latindex, Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, Caribe, España y Portugal.
- SCOPUS –<http://info.scopus.com>

Contacto: Marta Rodrigo

Directora Ejecutiva de la revista *Carreteras* / Asociación Española de la Carretera
Goya 23 4º Dcha. 28001 MADRID / Tf. 34 91 577 99 72 Fax 34 91 576 65 22 / e-mail: mrodrigo@aecarretera.com

Contacto: Recaredo Romero

Director Técnico de la revista *Carreteras* / e-mail: recaredo@recaredoluz.jazztel.es



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

Repsol Lubricantes y Especialidades, S.A.
Más información en [repsol.com](https://www.repsol.com)