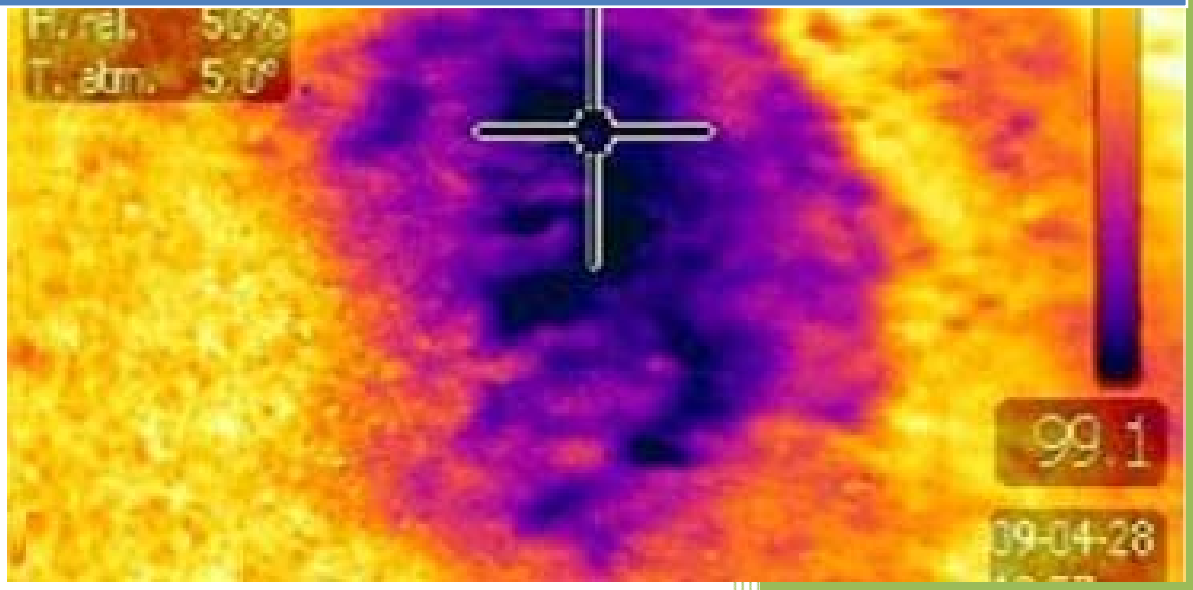
Monografía 2. Reducción de los impactos ambientales durante la construcción y explotación de firmes asfálticos.



Mayo 2011

PRÓLOGO

En el momento en que este prólogo se ha redactado, el Proyecto Fénix ha dado por concluida su actividad investigadora, quedando tan solo por concluir la labor de divulgación y el análisis de futuras líneas de investigación para el futuro próximo.

La perspectiva del tiempo permite realizar análisis mucho más certeros, especialmente cuando se dispone de mucha información y una menor presión causada por la necesidad de concluir a tiempo los trabajos programados.

De dicho análisis podríamos destacar dos conclusiones, no estrictamente técnicas: la primera es que definitivamente vale la pena invertir en I+D. El conocimiento generado en estos cuatro intensos años de trabajo demuestra que hemos avanzado mucho en el desarrollo de las tecnologías relacionadas con los firmes asfálticos pero, que al mismo tiempo, hay mucho camino que recorrer y que existen numerosos retos que debemos abordar para proporcionar a la sociedad las carreteras que demanda.

La segunda conclusión está relacionada con el trabajo en equipo. En un sector industrial bastante atomizado, nadie tiene el tamaño crítico para abordar muchos de los desarrollos que se han llevado a cabo en el Proyecto. La necesidad de buscar "compañeros de viaje" podría haber sido uno de los principales hándicaps del Proyecto y, sin embargo, ha sido una de sus mayores fortalezas debido a la generosidad de las empresas, organizaciones y personas que los representan, valorando como prioridad el trabajo colaborativo.

Otro aspecto fundamental del Proyecto Fénix ha sido su capacidad de divulgar una gran parte de los conocimientos adquiridos. La difusión de tecnologías, métodos de ensayo o análisis de diseños nos ha permitido hacer llegar nuestros mensajes a un gran número de interlocutores. Continuando con este afán de comunicación, presentamos la Monografía 2 del proyecto que bajo el subtítulo "Reducción de los impactos ambientales durante la construcción y explotación de firmes asfálticos" intenta profundizar en los factores críticos que nos permitan avanzar en una mejor integración de las carreteras en nuestras vidas, potenciando las ventajas que nos aportan y disminuyendo aquellos aspectos negativos que la actividad humana genera sobre el medioambiente.

Este prólogo no estaría completo sin un sincero agradecimiento a todas aquellas personas y organizaciones que en estos cuatro años han apoyado con plena convicción el desarrollo del Proyecto.

Juan José Potti

Coordinador del Proyecto Fénix.

CONTENIDO

PRÓLOGO 2

INTRODUCCIÓN 5

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA 7

RECICLABILIDAD 15

PROPIEDADES MECANICAS DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS CON RECICLADO A ALTAS TASAS 15

COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA BETÚN VIEJO-BETÚN REJUVENECEDOR EN RECICLADO A ALTAS TASAS 26

LÍMITES TEÓRICOS Y PRÁCTICOS EN EL RECICLADO EN CALIENTE EN ALTAS TASAS 40

SOBRE LA PREDICCIÓN DEL COMPORTAMIENTO A LARGO PLAZO DE LOS FIRMES RECICLADOS IN SITU CON EMULSIÓN BITUMINOSA. 53

INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DE MEZCLA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL RECICLADO EN FRÍO CON EMULSIÓN (RFE). 64

RECICLABILIDAD Y EMPLEO DE SUBPRODUCTOS 96

DURABILIDAD DE LOS FIRMES 130

MEJORAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS A PARTIR DEL CONTROL DE LA TEMPERATURA Y SEGREGACIONES TÉRMICAS EN SU EJECUCIÓN Y USO DE MEZCLAS ESPECIALES PARA EL FALLO POR FATIGA. 130

SECCIONES ESTRUCTURALES RESISTENTES A LA FISURACIÓN ASCENDENTE POR FATIGA 141

ENVEJECIMIENTO Y DURABILIDAD: FOTOOXIDACIÓN Y OXIDACIÓN TÉRMICA DE LOS LIGANTES BITUMINOSOS 157

FISURACIÓN DESCENDENTE: CAUSAS Y DESARROLLO DEL ENSAYO WRC COMO MÉTODO PREDICTIVO. 186

FABRICACIÓN A BAJA TEMPERATURA Y EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LAS PLANTAS DE FABRICACIÓN DE MEZCLAS BITUMINOSAS 208

ANÁLISIS DEL POTENCIAL ENERGÉTICO Y EXERGÉTICO DE LAS PLANTAS ASFÁLTICAS Y MEDIDAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA. 208

CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS BITUMINOSAS SEMICALIENTES 229

MEDIDA Y MINIMIZACIÓN DEL RUIDO PRODUCIDO POR EL TRÁFICO RODADO 249

ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES ACÚSTICAS DE LAS MEZCLAS POROSAS Y DISCONTINUAS PARA CAPAS FINAS 249

AGRADECIMIENTOS.....283

INTRODUCCIÓN

La construcción y el mantenimiento de las carreteras exigen, como en todas las infraestructuras viarias, grandes cantidades de recursos naturales durante su construcción, además de importantes consumos de energía. Además, durante la fase de explotación de las mismas se producen importantes impactos ambientales que pueden ser reducidos substancialmente mediante un correcto diseño y construcción de la carretera.

El Proyecto Fénix tiene como uno de sus objetivos principales el mejorar la sostenibilidad de las carreteras, desarrollando tecnologías que pueden reducir los impactos ambientales anteriormente citados.

Una de las grandes cuestiones es cuantificar y catalogar los impactos producidos en las diversas fases del "ciclo de vida de una carretera": construcción (que a su vez incluye varios subsistemas), conservación, explotación y el fin de vida de la carretera.

Durante el desarrollo del Proyecto Fénix se han publicado diversos trabajos relacionados con el uso del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) como herramienta que permita crear categorías de impacto y la importancia relativa de cada una de ellas. En la Monografía 1- Sostenibilidad- se mostraba un avance sobre el uso del ACV.

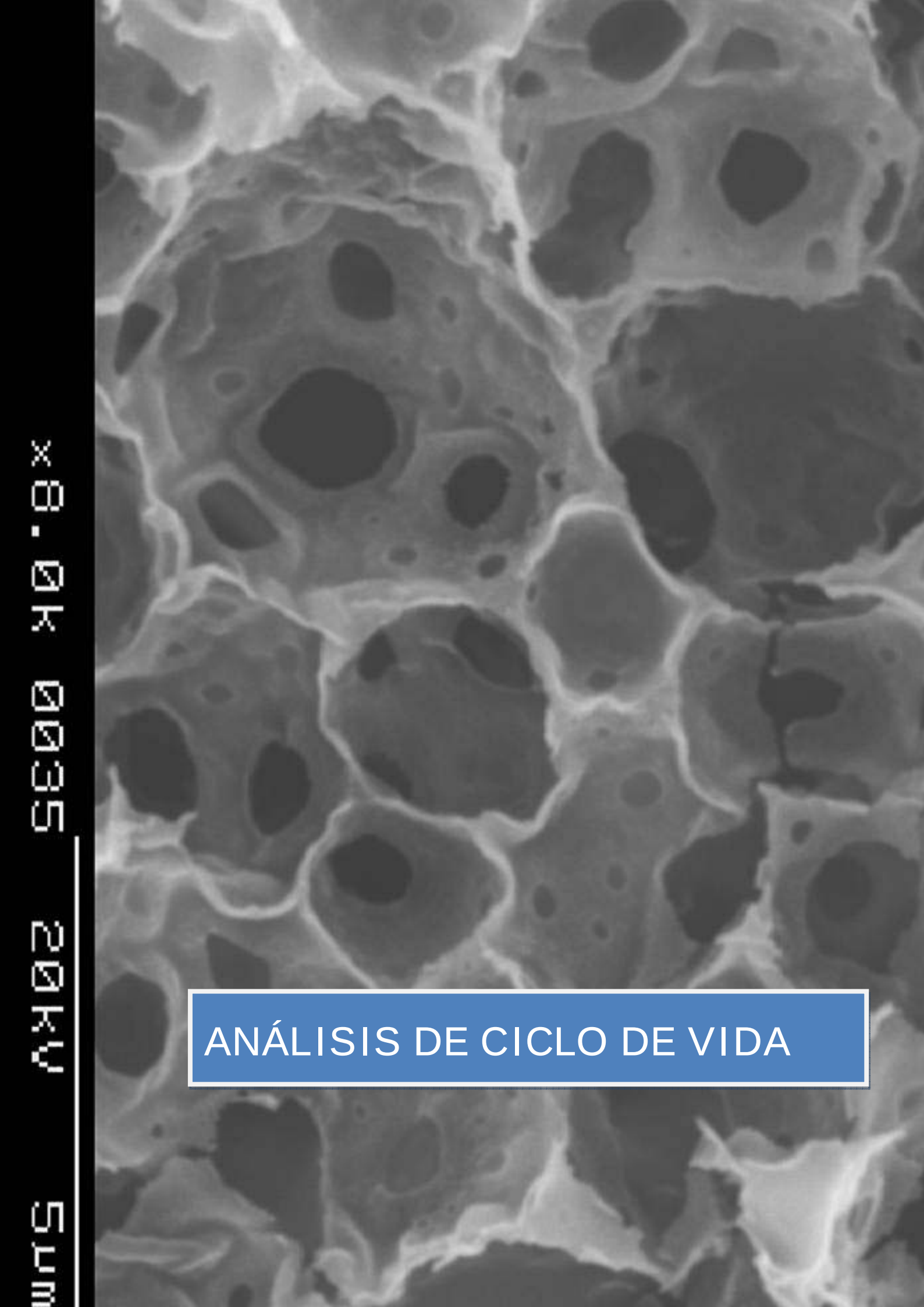
El trabajo acumulado en los casi cuatro años de Proyecto nos permiten mostrar un análisis mucho más completo, que va a ser el objeto principal de esta segunda monografía del Proyecto Fénix.

Los contenidos de esta Monografía se han creado teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- Utilizar el ACV como herramienta de análisis. Una vez realizado un estudio ambiental de la carretera (ya veremos por qué no podemos hablar de ACV con propiedad en esta parte del estudio), ver que fases de la construcción, explotación, etc de la carretera tienen mayor impacto. Tras ser identificadas, y siempre que estén dentro del campo de estudio del Proyecto, recopilar información relevante sobre tecnologías que han sido investigadas y que tienen una alta repercusión en la reducción de los impactos ambientales.

- Presentar trabajos originales, basados en experimentación desarrollada dentro del Proyecto.

Basándonos en estos criterios, la Monografía ha quedado estructurada en cuatro grandes grupos de contenidos. El primero está referido a la reciclabilidad, el segundo a la durabilidad de los pavimentos, el tercero a la eficiencia energética y, un último bloque, dedicado a un aspecto singular: la reducción de los impactos causados por el ruido generado en las carreteras.



ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

Cuando el Proyecto Fénix fue concebido, las temáticas escogidas fueron el fruto de horas de reflexión y de estudio de las tecnologías existentes en el mundo de la carretera, intentando prever el futuro al escoger aquellos campos que pudiesen generar un salto cualitativo y cuantitativo en el desarrollo del conocimiento.

Aunque se conocían metodologías como el Análisis del Ciclo de Vida (de hecho fue incorporada a dos tareas), no se tenían datos experimentales suficientemente contrastados que permitiesen hacer un pronóstico de cómo y cuánto puede afectar en los impactos ambientales una nueva tecnología o una mejora de la misma.

Ha sido durante el desarrollo del Proyecto cuando se ha podido obtener una vista en perspectiva de la influencia de cada fase que compone el ciclo de vida de una carretera. En este capítulo se va mostrar un resumen de los resultados obtenidos, intentando generalizar lo máximo posible las conclusiones, no tanto por un afán de intentar abarcar un campo más amplio, sino para evitar entrar en particularidades que nos alejen del objetivo final del Proyecto en esta fase de su desarrollo: el tomar decisiones sobre qué áreas del conocimiento es más prioritario seguir investigando y decidir que tecnologías se pueden pasar a una fase de implantación industrial.

Para todas aquellas personas que hayan trabajado en la evaluación de impactos mediante herramientas como el Análisis del Ciclo de Vida, les resultarán familiares las discusiones surgidas al intentar concretar qué campos son objeto del Análisis del Ciclo de Vida y cuáles no. Incluso, si se puede hablar de ACV cuando no podemos definir un fin de vida de un producto o un sistema.

Por esta razón veremos que en algunos casos sí se podrá establecer el Análisis de Ciclo de Vida de una parte del sistema a estudiar (por ejemplo: la fabricación de mezclas bituminosas), mientras que en otros casos hablaremos de un Estudio Ambiental (como es el caso de una carretera considerando su construcción, explotación y mantenimiento).

1 .ELECCIÓN DEL ECOINDICADOR

Otra de las dudas que se han planteado durante el Proyecto ha sido qué ecoindicador utilizar como referencia. En la actualidad los ecoindicadores basados en la huella de carbono (CO_2 equivalente ó energía) tienen gran predicamento, posiblemente debido a su simplicidad y facilidad de difusión mediática.

Es precisamente su excesiva simplicidad su gran punto débil, ya que en muchos casos sólo permiten ver una parte muy sesgada del campo a analizar. Por esta razón, en una de las tareas del proyecto Fénix se decidió completar la información de los ecoindicadores de huella de carbono con uno más complejo: el Ecoindicador

99. Más detalles sobre el mismo se pueden consultar en la Monografía 1 o en la siguiente referencia bibliográfica [6].

2. MARCO GLOBAL EN EL ANÁLISIS DE UNA CARRETERA

Por definición, el Ciclo de Vida incluye todas las etapas del producto, servicio o actividad seleccionadas que presentan una interrelación con el Medio.

Por tanto, todas las actividades realizadas en el marco del proyecto FÉNIX están, de una u otra manera, reflejadas o incluidas en alguna de las etapas definidas para el Ciclo de Vida de la carretera. A su vez, es posible que algunas de las actividades realizadas en cada una de las tareas del proyecto puedan tener algún efecto potencial en los resultados del Análisis del Ciclo de Vida realizado.

Para lograr la minimización del impacto ambiental, la gestión empresarial debe realizarse teniendo una visión global del proceso, desde la cuna a la tumba, o, en términos más ambiciosos, desde la cuna a la reencarnación, de manera que se conozcan los recursos consumidos por unidad de producto y los residuos que se generan (Figura 1). Esta perspectiva sólo se alcanza con el Análisis del Ciclo de Vida (ACV), que constituye una herramienta de gestión medioambiental para alcanzar la ecoeficiencia.

“El ACV es un proceso objetivo para evaluar las cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad. Esto se lleva a térmico identificando la energía, materias utilizadas y los residuos de todo tipo de vertido al medio, determinando el impacto de este uso de energía y materias y de las descargas al medio; evaluando e implementando prácticas de mejora ambiental”.

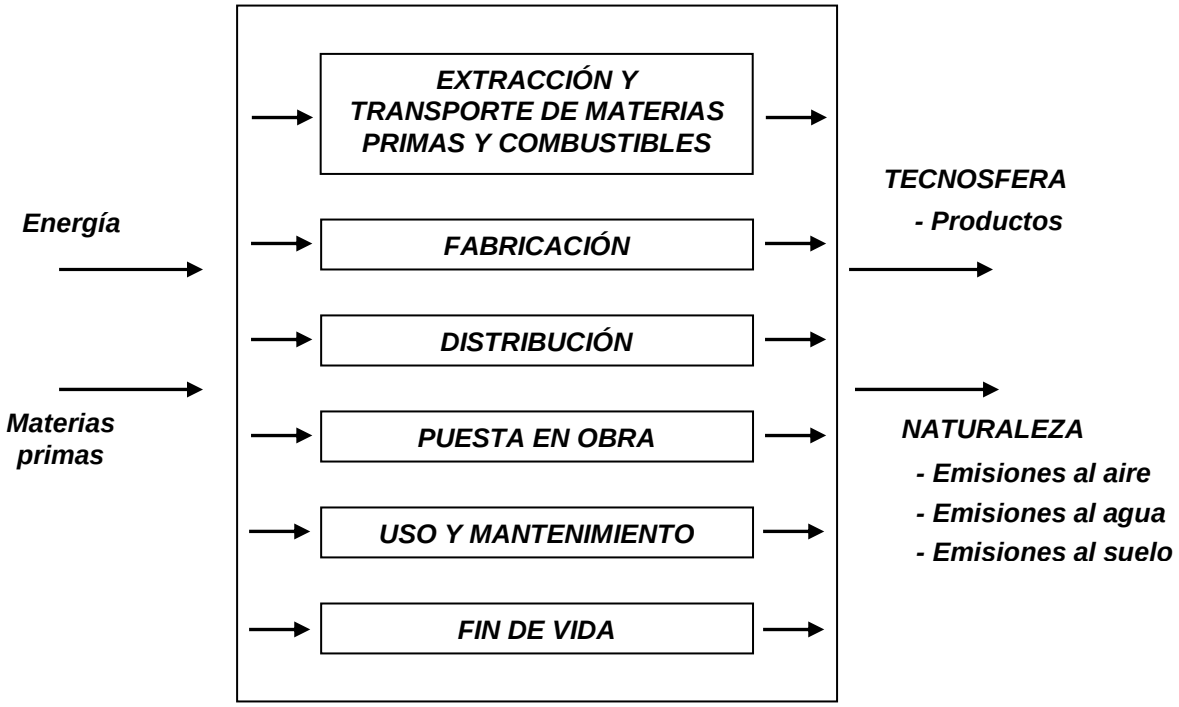


Figura 1 . Inventario del Ciclo de vida

Desde un punto de vista teórico, el análisis incluye el estudio del ciclo de vida completo del producto, proceso o actividad, y comprende las etapas reflejadas en la Figura 2.

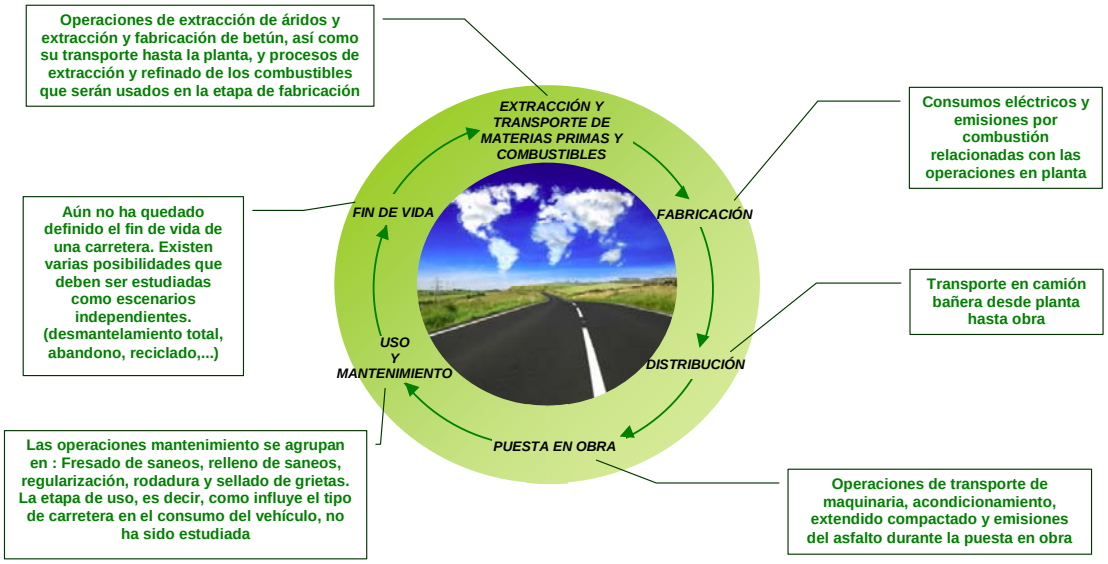


Figura 2 . Ciclo de vida de la carretera

En el estudio realizado dentro del Proyecto Fénix, se ha tomado la decisión de no considerar la existencia de un fin de vida en el sentido estricto, ya que a menos que haya un cambio tecnológico drástico que condicione la configuración física actual de las carreteras, en el último siglo la mayoría de ellas han sufrido un proceso de mejora y acondicionamiento continuo, no siendo necesaria su demolición a menos que exista un fallo constructivo crítico o un cambio de trazado.

Por lo tanto, las fases consideradas en el estudio incluyen la construcción y el mantenimiento de las carreteras. Tampoco ha sido objeto de estudio la explotación de las mismas, entendiendo por tal los impactos generados por el tránsito de vehículos y personas sobre las mismas, excepto en la temática relacionada con el ruido, que es objeto de una sección específica. Dicha fase de explotación es, según la mayoría de los datos bibliográficos, la mayor causante de impactos, pudiendo a llegar a ser unas 100 veces superiores a los generados por la construcción y el mantenimiento. La razón para no haber abordado de forma general en este estudio la fase de explotación es que la programación de trabajos de las tareas del Proyecto no permitía reubicar una temática como ésta dentro del programa de trabajo con garantías de abordarla con los necesarios recursos humanos y materiales. Además, aunque ciertos elementos como la regularidad superficial del pavimento si pueden tener una influencia substancial en dichos impactos debidos a la explotación, la mayoría de los mismos son ajenos a las temáticas relacionadas con el diseño y construcción de carreteras, que es el objetivo último del Proyecto Fénix.

Teniendo en cuenta todas estas consideraciones, aplicando la metodología e Ecoindicador 99 a una carretera tipo (en este caso una sección 122 del catálogo de la instrucción española 6.1-IC durante un periodo de 30 años) nos encontramos una distribución de los impactos causados en cada una de las fases consideradas como la que se muestra en la Figura 3. En dicha figura se muestran los resultados obtenidos bajo la óptica de dos ecoindicadores: huella de carbono y ecoindicador 99.

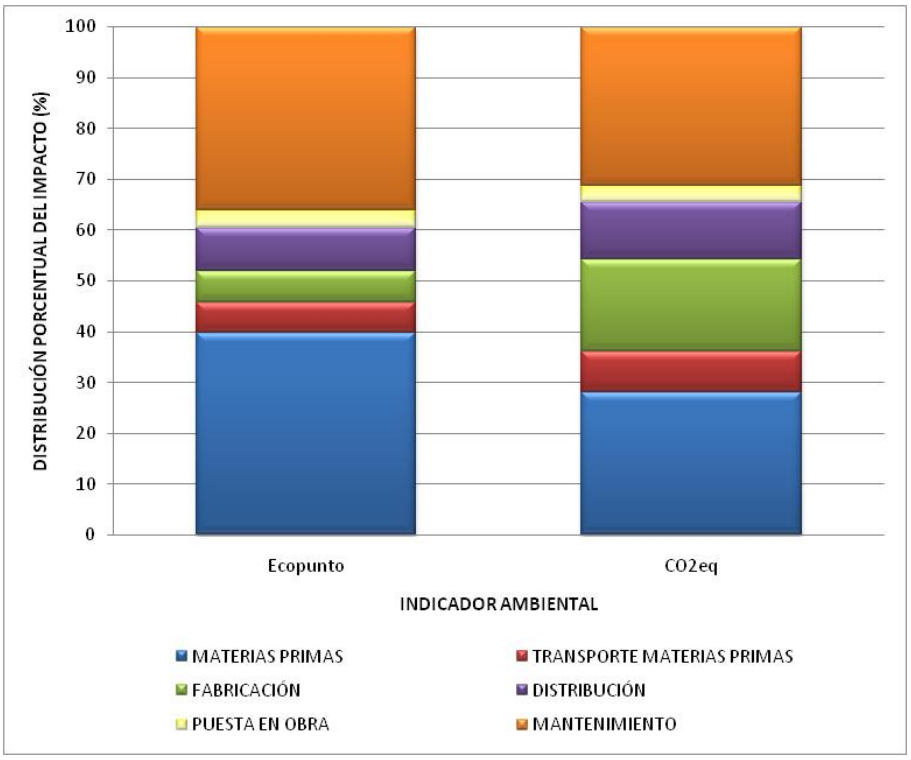


Figura 3. Resumen de los ecoindicadores obtenidos en el estudio ambiental de uan sección de firme S122 durante un periodo de 30 años.

Del análisis de dicho gráfico se pueden extraer varias conclusiones:

- Los mayores impactos provienen de las materias primas utilizadas tanto en la primera construcción como en la rehabilitación.
- El transporte de materias primas y la distribución puede ser un factor importante a tener en cuenta cuando la las obras estén lejos de puntos de los puntos de suministro de los áridos o de las plantas de fabricación (el reciclado de firmes es la mejor solución en estos casos).
- La puesta en obra es relativamente irrelevante en términos de impactos ambientales directos. Sin embargo, los resultados obtenidos en el Proyecto Fénix relativos a la calidad de las mezclas en función de las condiciones de aplicación en obra indican que la durabilidad de los firmes puede verse muy severamente afectada por una inadecuada puesta en obra. Puesto que la necesidad de una rehabilitación prematura sí tiene un gran impacto, la fase de puesta en obra debe considerarse como un objetivo prioritario.

Finalmente, en la introducción se ha citado la posibilidad de cuantificar el los impactos generados por el ruido producido en la carreteras. Este es realmente un

punto novedoso que ya ha sido tratado por autores como Müller-Wenk, R. o Nielsen P.H. Estos autores han desarrollado metodologías dirigidas a convertir medidas de impacto sonoro a la categoría de daño a la salud humana. Dichas metodologías son pioneras en este campo y, como ocurre con la mayoría de los nuevos desarrollos, objeto de discusión y controversia.

A pesar de las dudas que generan, lo que sí permiten vislumbrar es que el ruido puede tener una importancia en términos de impacto, medidos como daños a la salud humana, del mismo orden que los componentes de mayor ponderación tenidos en cuenta en el análisis de ciclo de vida.

La importancia de estos estudios es que nos permiten generar herramientas que ayudan a valorar cuánto impacto genera el ruido del tráfico y cuánto puede ser disminuido mediante una adecuada construcción y diseño de los pavimentos. El conocimiento de los mecanismos intrínsecos de generación del ruido y cómo ciertas variables constructivas (porcentaje de huecos, macrotextura, tamaño máximo de árido, tipo de ligante etc) controlan dicha generación de ruido.

La importancia que puede tener el ruido en el cómputo de los análisis de ciclo de vida nos ha llevado a incluir algunos de los trabajos realizados en el Proyecto Fénix en el campo de la acústica aplicada a las carreteras como contribuciones relevantes al objetivo genérico de minimizar los impactos medioambientales de las carreteras.

Desde el punto de vista de análisis del ACV, los potenciales impactos generados por el ruido no han sido incluidos debido a las dudas que existen sobre las metodologías empleadas y su cuantificación. Sin embargo, informes recientes como el elaborado por la OMS [5] identifican al ruido como un contaminante de primer grado cuyo impacto en términos de daños a la salud se ha estimado en 1,0-1,5 millones de DALYs.

Si tenemos en cuenta que el tráfico rodado es uno de los principales causantes de dicha contaminación, es fácil deducir la importancia capital que tiene el desarrollo de tecnologías que mejoren la absorción de ruido de los vehículos al transitar por las carreteras y, al mismo tiempo, reducir la generación de ruido.

3. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Müller-Wenk, R., “Life-cycle impact assessment of road transport noise”, IWÖ Universität St. Gallen, Switzerland, 1999.

[2] Müller-Wenk, R., “Attribution to road traffic of the impact of noise on health”, Environmental series n. 339, SAEFL, Bern, Switzerland, 2002.

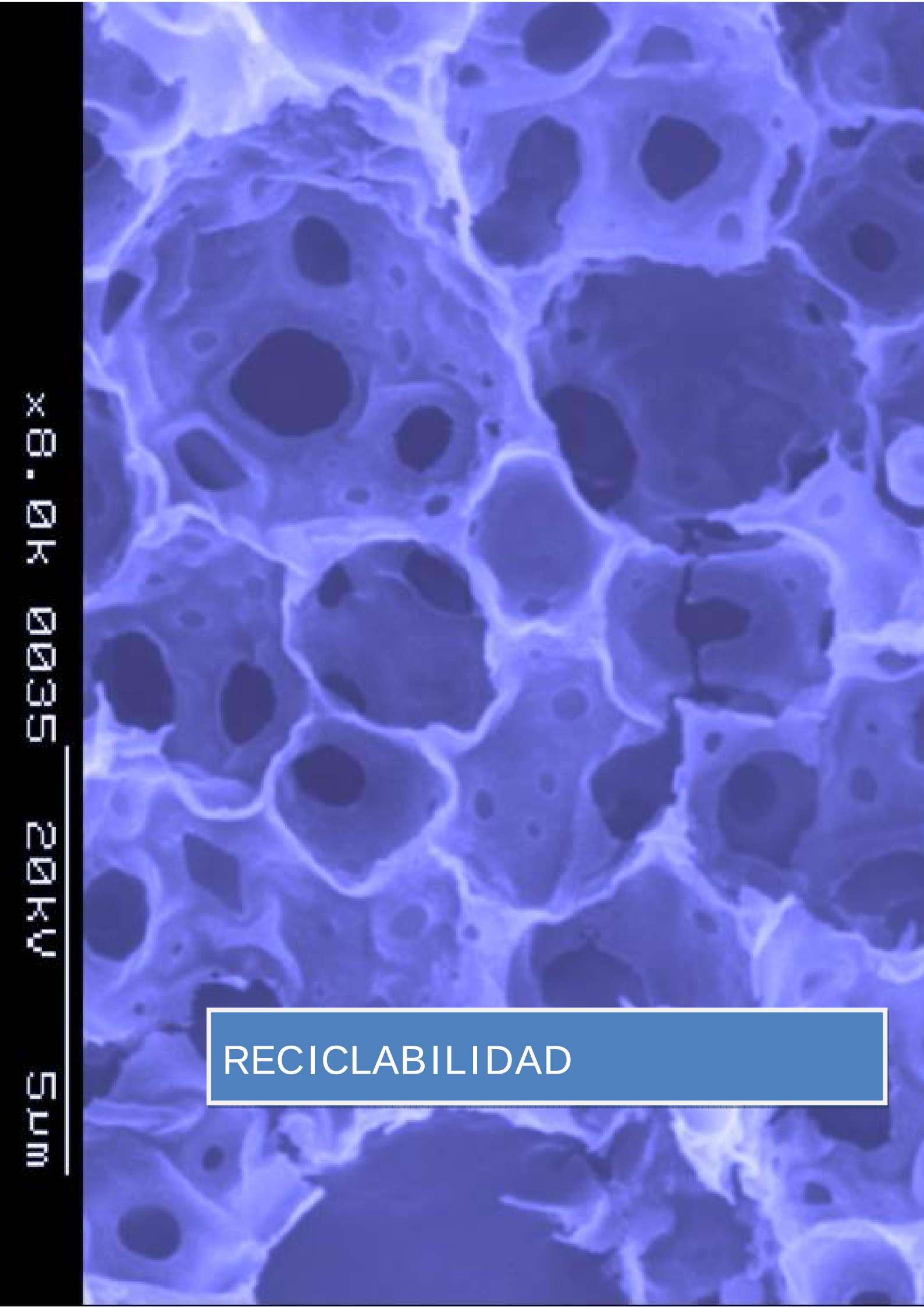
[3] Müller-Wenk, R. “A method to include LCA road traffic noise and its health effects”, International Journal of Life Cycle Assessment 9 (2), 2004, pp. 76-85.

[4] Nielsen, P.H., Laursen, J.E. “Background for spatial differentiation in LCA impact assessment - The EDIP2003 methodology – Part 9: Integration of external noise nuisance from road and rail transportation in life-cycle assessment”, Danish Environmental Protection Agency, Denmark, 2003.

[5] Burden of disease from environmental noise. World Health Organization. Regional Office for Europe.2011.

[6] PRé Consultants bv (2000) Ecoindicador’99. Manual for Designers. A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment.Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment. Disponible en:

www.pre.nl/download/EI99_Manual.pdf



RECICLABILIDAD

RECICLABILIDAD

PROPIEDADES MECANICAS DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS CON RECICLADO A ALTAS TASAS

AUTORES

Nuria Querol (SORIGUE), Julio del Pozo (SORIGUE)

1. INTRODUCCION

El material procedente del reciclado de firmes es susceptible de su reutilización en el diseño de nuevas mezclas asfálticas en caliente como RAP (reclaimed asphalt pavement). Esta técnica se ha convertido en una alternativa cada día mas utilizada por motivos no solo económicos, sino técnicos y medio ambientales. Su uso viene favorecido por el constante aumento del precio del petróleo, la escasez de áridos de alta calidad y las presiones medioambientales doblemente justificadas por la disminución del uso de recursos naturales no renovables y la disminución la generación y acopio de residuos.

Para facilitar el uso del RAP muchos países han establecido normativas o incluso limites teóricos en su utilización. En España se elabora la orden circular 8/01 sobre el reciclado de firmes, donde, en el apartado de reciclado en central, se especifica que una mezcla bituminosa reciclada es aquella que contiene entre un 10 y un 50% en peso total de RAP. Sin embargo el uso de grandes cantidades de RAP no es hoy en día la práctica más común. Según los datos de la EAPA, correspondientes al año 2009, en España tan solo se reciclan el 5% del material susceptible de su reutilización. Esta cifra queda muy lejos de los 60 y 70% alcanzados en otros países europeos.

A pesar de los avances técnicos que se han hecho en los últimos años en el diseño de mezclas que contienen RAP en su formulación, quedan todavía muchas preguntas sin resolver:

¿Cuál es el porcentaje máximo de RAP que se puede utilizar en una mezcla en caliente?

¿A que pretratamientos se puede someter el RAP para maximizar sus prestaciones en posteriores mezclas?

¿Hasta qué porcentaje de RAP se pueden utilizar betunes convencionales como agentes regenerantes y cuando debemos utilizar ligantes rejuvenecedores específicos?

¿Con las mezclas con reciclado se obtienen mezclas de igual calidad que sus homologas convencionales? O por el contrario, podemos incluso obtener mezclas de mayor calidad?

Para tratar de dar respuesta a todas estas preguntas, entre otras, se ha abordado un exhaustivo trabajo de investigación dentro del Proyecto Fénix, en la Tarea 11 correspondiente al reciclado en caliente a altas tasas. Para ello se han estudiado diferentes posibilidades de agentes rejuvenecedores a diferentes tasas, y se han caracterizado tanto a nivel físico-químico como reológico. Se ha estudiado la influencia del calentamiento del RAP en la variación de sus propiedades físico-químicas y posteriormente se han fabricado mezclas con dichos ligantes para intentar correlacionar los resultados una vez fabricadas las mezclas.

2. PROPIEDADES DEL LIGANTE DEL RAP

En general, los ligantes sufren dos estados de envejecimiento: a corto y largo plazo. Durante la fabricación (corto plazo) el ligante es sometido al efecto del aire caliente a temperaturas que alcanzan los 135-163 ºC. Este efecto da como resultado un aumento de la viscosidad y cambios importantes en sus propiedades reológicas y fisicoquímicas como el modulo complejo o la adhesividad. Durante la vida en servicio (largo plazo) el ligante se envejece progresivamente.

Podemos resumir que el envejecimiento es debido principalmente a los siguientes seis fenómenos:

OXIDACIÓN: a través de la reacción entre el ligante y el oxigeno del aire.

VOLATILIZACIÓN: a través de la evaporación de los componentes más ligeros, especialmente en el momento de la fabricación.

POLIMERIZACIÓN: a través de reacciones químicas de sus componentes moleculares.

TIXOTROPIA: cambio de la viscosidad del ligante dependiente del tiempo y el esfuerzo de cizalla sometido.

SINERESIS: por la separación entre asfaltenos y maltenos, y

SEPARACIÓN: por la absorción de aromáticos, resinas y asfáltenos por parte de los áridos de la mezcla.

El grado de envejecimiento de estos ligantes depende del grado de daño del pavimento a reciclar. Cuanto mayor sea el grado de daño, más envejecido estará su ligante.

A medida que el ligante se envejece, va perdiendo algunos de sus componentes y su comportamiento reológico lógicamente diferirá del ligante original. Esto sugiere la importancia de controlar el grado de mezclado entre el ligante viejo y el nuevo. Si el ligante viejo es demasiado rígido, la mezcla del viejo y nuevo puede que no alcance las prestaciones deseadas inicialmente. Para bajas tasas de reciclado

(alrededor del 20%), este efecto no será importante, pues la contribución del ligante viejo en la mezcla final es muy poco significativa, pero para tasas medias y altas (superiores al 50%) el ligante envejecido puede influir muy significativamente en el comportamiento final de la mezcla y es absolutamente necesario tener en cuenta sus características físico-químicas para el diseño del nuevo ligante.

3. REGENERACION DEL LIGANTE ENVEJECIDO

Para regenerar las propiedades del ligante envejecido, este tiene que ser mezclado con un agente rejuvenecedor. Los más utilizados son los betunes blandos o los rejuvenecedores. Los betunes blandos disminuyen la viscosidad del ligante viejo mientras que los agentes rejuvenecedores reestructuran las propiedades físicas y químicas. Los más utilizados son aquellos que tienen un bajo contenido de saturados y asfaltenos y alto contenido de aromáticos.

Para estudiar qué influencia tiene el uso del rejuvenecedor en el diseño de nuevas mezclas, se ha abordado un estudio a dos tasas diferentes de reciclado: 50 y 80%, evaluando el comportamiento de diferentes posibilidades como agentes rejuvenecedores. Para en reciclado al 50% se ha estudiado: un betún 150/200, un betún rejuvenecedor, un betún convencional 60/70, para estudiar qué pasaría si no se utiliza ningún tipo de rejuvenecedor y para el 80% un betún rejuvenecedor con ceras, una emulsión rejuvenecedora y un betún rejuvenecedor.

Las combinaciones estudiadas se resumen en las siguientes tablas (1 y 2):

RAP 50%	PROPORCIONES	
	50%	50%
BA	B_{VIEJO}	$B_{150/200}$
BB	B_{VIEJO}	B_{REJUV}
BC	B_{VIEJO}	$B_{50/70}$
BD	$B_{50/70}$	

Tabla 1: Combinación de ligantes para tasas de reciclado del 50%.

RAP 80%	PROPORCIONES	
	80%	20%
B1	B_{VIEJO}	$B_{REJU+CERAS}$
B2	B_{VIEJO}	E_{REJUV}
B3	B_{VIEJO}	B_{REJUV}

Tabla 2. Combinación de ligantes para tasas de reciclado del 80%.

Cabe destacar que en todos los casos se ha conseguido reestructurar el ligante envejecido, consiguiendo como resultado un ligante con características muy similares al ligante convencional.

El diseño de un betún rejuvenecedor se ha de realizar con un estudio reológico de sus propiedades en función de las solicitaciones mecánicas, térmicas y de envejecimiento a los que va a ser sometido.

No hay que rejuvenecer por igual una capa de rodadura, que una intermedia que una de base, ni un betún que va a someterse a climas fríos, cálidos o calurosos.

Una vez estudiado y caracterizado el comportamiento tanto físico-químico como reológico de todos estos ligantes se pasa a fabricar mezclas para evaluar su comportamiento mecánico.

4. MEZCLAS BITUMINOSAS FABRICADAS CON UN 50% DE RAP

En este caso se fabrica cuatro mezclas tipo AC 22 SURF 50/70 D con los diferentes agentes rejuvenecedores estudiados. Los resultados medios obtenidos en los ensayos mecánicos realizados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 1: Resultados medios obtenidos en los ensayos mecánicos realizados.

PARAMETRO	AC 22 SURF 50/70 D 50% RAP			
	Betún A	Betún B	Betún C	Betún D
Densidad probetas cilíndricas (gr/cm^3)	2.424	2.442	2.394	2.437
Densidad probetas prismáticas (gr/cm3)	2.378	2.344	2.424	2.415
% compactación vigas	98,1	96,0	100,0	99,1
Densidad placas pista (gr/cm3)	2.377	2.336	2.368	2.369
% compactación placas	98,0	95,6	98,9	97,2
Módulo de rigidez a 20ºC (MPa)	6.825	6.340	9.910	5.064
RTI en seco a 15ºC (MPa)	2,63	2,98	3,04	2,82
RTI en húmedo a 15ºC (MPa)	2,41	2,95	3,16	2,62
Tensión máxima Fénix a 20ºC (MPa)	1,02	0,72	1,52	0,37
IRT Fénix a 20ºC (KN/mm)	6,44	6,45	13,19	14,03
Energía de fractura Fénix a 20ºC (J/m^2)	377	548	350	505
Módulo a flexión en 4 puntos a 20ºC (MPa)	5.917	5.588	10.182	6.126

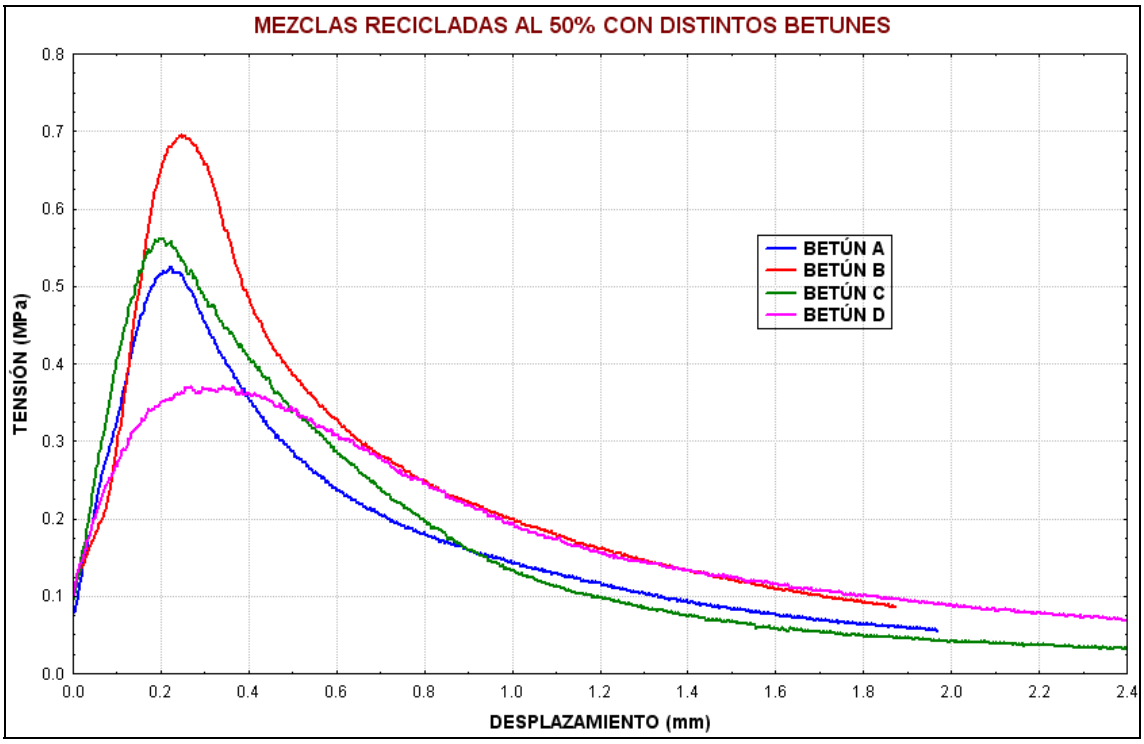
Ley de fatiga a flexión en 4 puntos a 20ºC [Є=a*N^(-b)], **a**	**0,0003**	**0,0004**	**0,0002**	**0,0005**
Ley de fatiga a flexión en 4 puntos a 20ºC [Є=a*N^(-b)], **b**	**0,0530**	**0,0760**	**0,0330**	**0,0700**
Ley de fatiga a flexión en 4 puntos a 20ºC [Є=a*N^(-b)], **$Є_6$, (µm)**	**144,25**	**139,98**	**126,77**	**190,09**
WTS_{AIRE} ensayo de rodadura (mm x 10^3ciclos)	**0,0329**	**0,0650**	**0,0258**	**0,0620**
Deformación total ensayo de rodadura (mm)	**1,50**	**2,50**	**1,20**	**2,50**

Las densidades obtenidas para las probetas cilíndricas han sido similares en todos los casos, aunque ligeramente superiores para el betún B.

Las resistencias conservadas del 92, 99,102 y 93 % para los cuatro ligantes respectivamente cumplen sobradamente con las exigencias normativas del 80%.

En la compactación de placas se han obtenido mayores densidades para los betunes C y D, llegando al 100% de densidad, mientras que la placa fabricada con el betún B ha quedado por debajo del 96% de compactación.

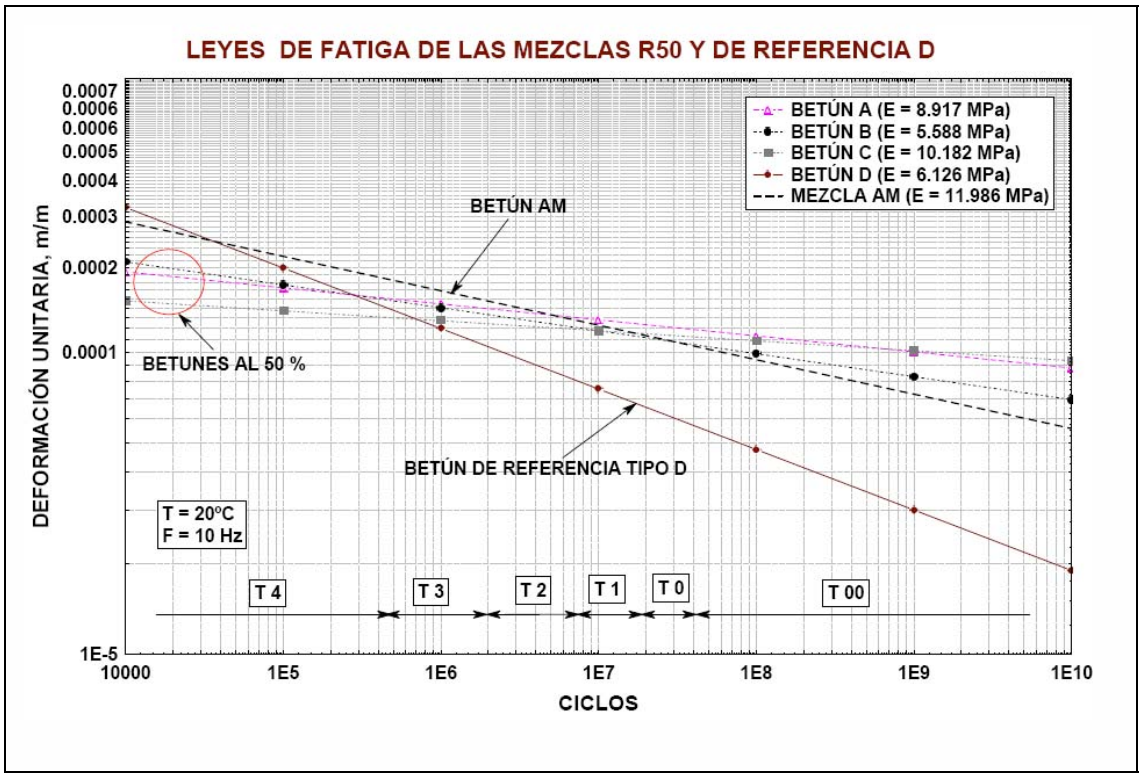
El modulo de rigidez y modulo IRT (ensayo Fénix) son prácticamente iguales para el betún A y el B. La mezcla fabricada con el ligante B presenta una resistencia un poco mayor tanto en tracción indirecta como en el ensayo Fénix y su energía de fractura también es mayor. Sin embargo, las mezclas fabricadas con los ligantes C y D difieren notablemente en módulos de rigidez, tensión máxima y energía de fractura. Siendo la mezcla C la más rígida de las cuatro.



Grafica 1. Representación de las curvas medias de tensión-desplazamiento obtenidas en los ensayos Fénix a 20ºC.

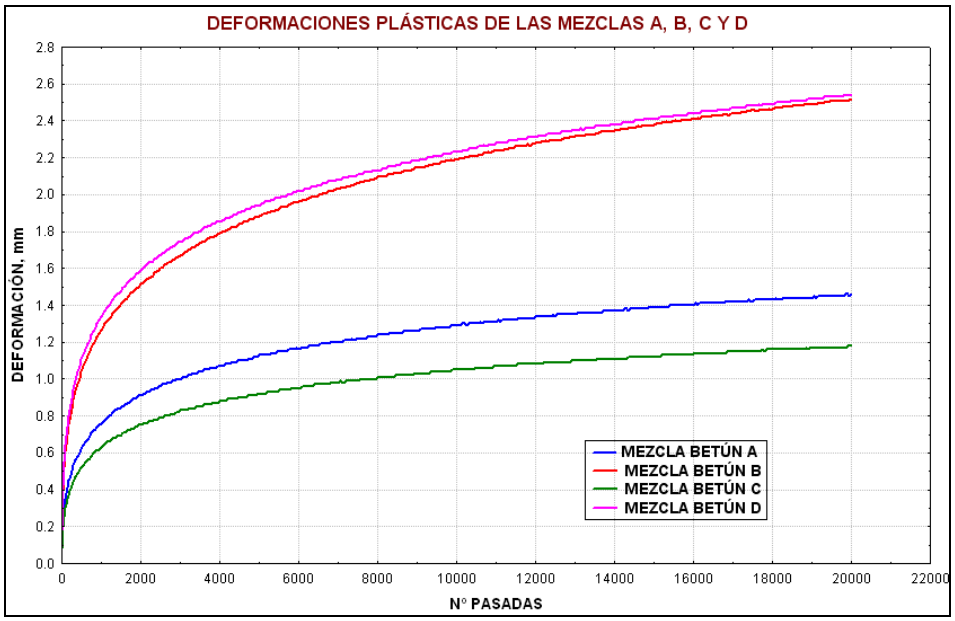
Los resultados obtenidos en los ensayos de fatiga y rodadura difieren notablemente. Las mezclas fabricadas con los betunes A y B presentan un módulo alto, algo mayor al de la mezcla de referencia D, quedando nuevamente de manifiesto la excesiva rigidez de la mezcla C con el valor de modulo más alto.

La ley de fatiga pone de manifiesto la similitud de las pendientes de la línea de las mezclas B y D aunque el valor de la ε_6 de esta última es el as elevado y por lo tanto tiene mejor comportamiento a fatiga que la mezcla B. La mezcla A también tiene un mejor comportamiento a fatiga que la B, puesto que con similar ε_6 tiene una pendiente menor.



Grafica 2. Leyes de fatiga para las mezclas fabricadas al 50%.

Por lo que hace referencia al ensayo de pista, todas las mezclas parecen presentar una elevada resistencia a las deformaciones plásticas, ya que ambas mezclas cumplen con los límites establecidos en el artículo 542 del PG-3 para este tipo de mezclas donde (WTS aire ≤ 0.07 mm/103).



Grafica 3: Resultados obtenidos para los ensayos de rodadura realizados a las probetas fabricadas con las mezclas A, B, C y D.

5. MEZCLAS BITUMINOSAS FABRICADAS AL 80% DE RAP

En este caso se fabrican las mezclas tipo AC 22 SURF 50/70 S con tres rejuvenecedores diferentes: un rejuvenecedor con ceras, una emulsión rejuvenecida con ceras y un betún convencional. Los resultados obtenidos de los ensayos mecánicos son los siguientes:

PARAMETRO	AC 22 SURF 50/70 S 80% RAP		
	Betún 1	Betún 2	Betún 3
Densidad probetas cilíndricas (gr/cm^3)	2.521	2.521	2.517
Densidad probetas ensayo pista (gr/cm^3)	2.464	2.491	2.456
Módulo de rigidez a 20ºC (MPa)	5461	5524	7484
RTI en seco a 15ºC (MPa)	2,31	2,40	3,08
RTI en húmedo a 15ºC (MPa)	1,88	2,38	2,7
Tensión máxima Fénix a 20ºC (MPa)	0,37	0,36	0,41
IRT Fénix a 20ºC (KN/mm)	4,68	5,43	4,98
Energía de fractura Fénix a 20ºC (J/m^2)	498	371	411
Módulo a flexión en 4 puntos a 20ºC (MPa)	6.077	4.434	7.315
Ley de fatiga a flexión en 4 puntos a 20ºC [Є=a*N^(-b)], **a**	0,0009	0,0014	0,0007
Ley de fatiga a flexión en 4 puntos a 20ºC [Є=a*N^(-b)], **b**	0,119	0,1419	0,102
Ley de fatiga a flexión en 4 puntos a 20ºC [Є=a*N^(-b)], **$Є_6$, (µm)**	173,88	178,7	171,04
WTS_{AIRE} ensayo de rodadura (mm x 10^{3}ciclos)	0,0452	0,0802	0,0573
Deformación total ensayo de rodadura (mm)	2,4	3,3	2,60
$V_{105/120}$ ensayo de pista (µm/min)	4,0	8,0	6,7
Deformación total ensayo de pista (mm)	1,8	2,3	1,1

Tabla 2: Resultados obtenidos en los ensayos mecánicos realizados en las mezclas con RAP 80%.

Los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a la tracción indirecta, determinación del módulo de rigidez y Fénix, se ha observado que las propiedades mecánicas de las mezclas fabricadas con el rejuvenecedor más ceras y la emulsión más ceras han sido similares, cumpliendo en todos los casos con las exigencias normativas.

La mezcla fabricada con la emulsión ha obtenido mejores resistencias conservadas tras inmersión en los ensayos de tracción indirecta.

La mezcla fabricada a partir del rejuvenecedor convencional ha sido la que ha obtenido mayores módulos y mayores resistencias a tracción indirecta.

En los ensayos de fatiga la mezcla fabricada con el rejuvenecedor convencional obtuvo de nuevo los módulos más elevados y la una menor pendiente para la ley de fatiga.

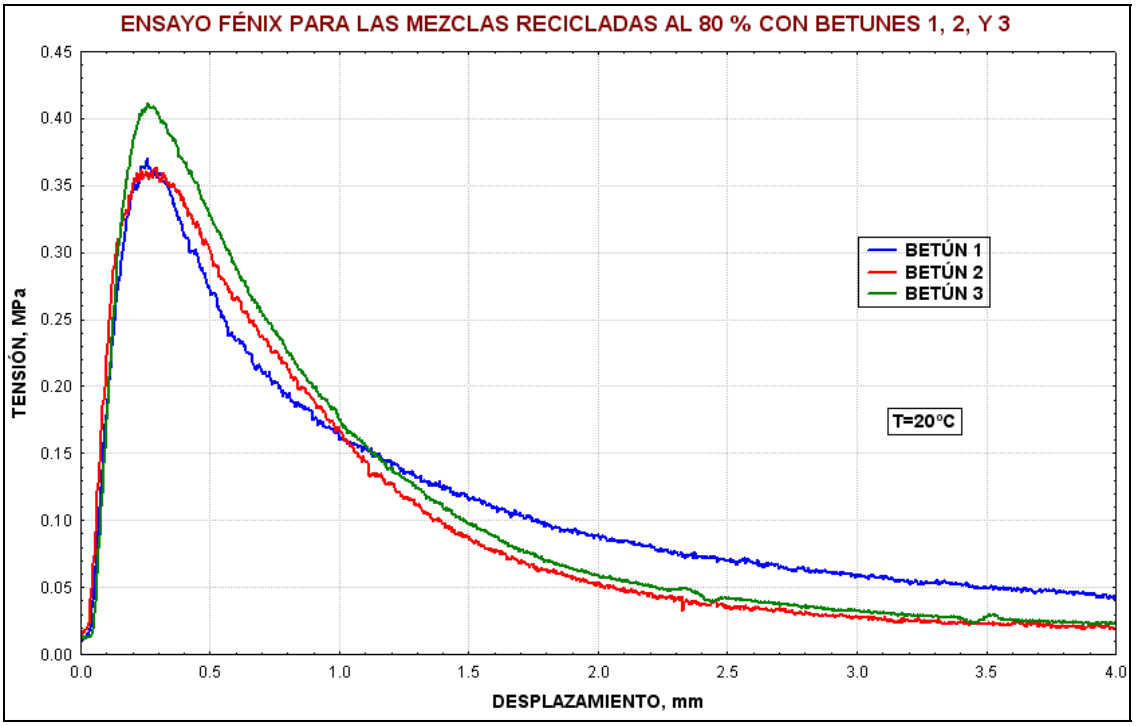
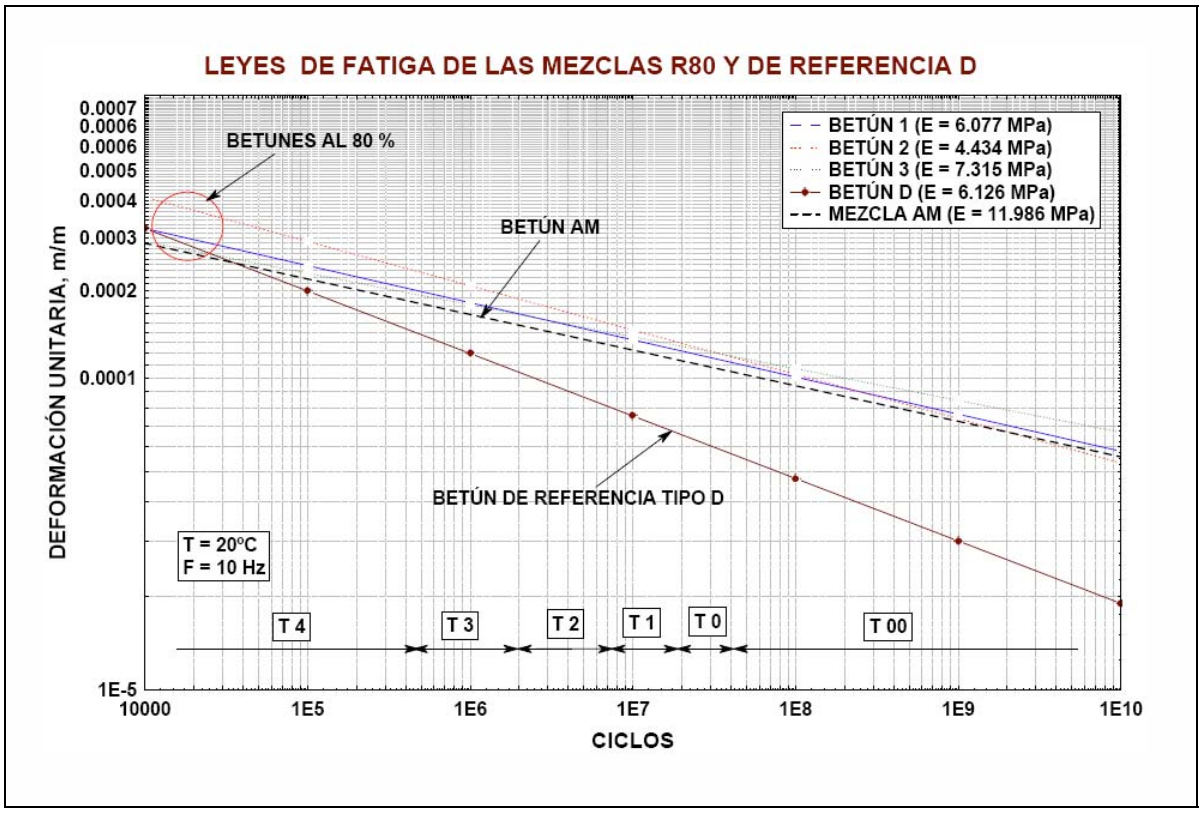


Grafico 4: Ensayo Fénix para las mezclas recicladas al 80%.

La mezcla fabricada con el rejuvenecedor convencional fue la que obtuvo mayores tensiones máximas, aunque fue la mezcla fabricada a partir del rejuvenecedor + ceras la que mostró las mayores energías de fractura.



Grafica 5: Leyes de fatiga para las mezclas recicladas al 80%.

Aunque las diferencias no han sido muy importantes, se observa como la mezcla que obtuvo los módulos más elevados en los ensayos de determinación del módulo de rigidez a tracción indirecta ha sido la que ha obtenido un menor pendiente en la ley de fatiga. Por lo tanto dado que los valores de ε6 son similares, la mezcla 3 sería la más adecuada para firmes potentes con alto nivel de tráfico.

Es conveniente observar cómo a mayor ε_6 menor pendiente (valor de b), por lo tanto se puede decir que cuanto más bajo sea el valor de ε_6 más adecuado para firmes delgados y con poco tráfico pero pesado, y por el contrario cuanto más alto sea el valor de ε_6 mejor para mezclas en base de firmes potentes con bajas deformaciones.

6. CONCLUSIONES

El reciclado en caliente a altas tasas es viable en laboratorio, siendo posible rejuvenecer los betunes al efecto de obtener calidades adecuadas, bien para capas de base, intermedias o de rodadura.

Las mezclas obtenidas con los betunes rejuvenecidos, no solamente no son inferiores a las convencionales, sino que superan a éstas en propiedades específicas.

La fabricación en planta a altas tasas presenta problemas todavía no resueltos satisfactoriamente que obligan a modificaciones en la maquinaria actual.

El RAP producido en la actualidad, se elimina sobradamente mediante tasas del 10 % al 20%, por lo que, de momento, salvo excepciones que siempre habrá, no existe en este sector demanda de nuevos métodos que permitan el reciclado a altas tasas.

En el reciclado de rodaduras in situ, sí que se utilizan altas tasas de reciclado, y es donde se puede aprovechar toda la experiencia obtenida en el laboratorio.

7. BIBLIOGRAFIA

[1] Imad L. Al-Qadi et al. Reclaimed asphalt pavement. A literature review. Illinois Center for Transportation Series No. 07-001.March 2007.

[2] Lesueur, D La rhéologie des bitumes. Principios y modificación. 2002.

[3] Lesueur D, et al. A structure-related model to describe asphalt linear viscoelasticity.1996.

[4] The Shell Bitumen Handbook. Fifth Edition.

[5] Superpave Mix Design. Series nº 2 (SP-2). Asphalt Institute

[6] NCHRP Report 430.Improved Safety Information to Support Highway Design. Transportation Research Board. National Research Council.

[7] NCHRP Report 465. Simple Performance Test for Superpave Mix Design. Transportation Research Board. National Research Council.

[8] NCHPR REPORT 459. Characterization of Modified asphalt Binders in Superpave Mix design. Transportation Research Board. National Research Council.

[9] Experimental Analysis of Factors Affecting Resilients Modulus of the Hot Mix Asphalt. Mofrent and Su Jian. University of Canterbury.

[10] Low Temperature Thermal Cracking of Asphalt Binder by Asphalt Binder Cracking device.

COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA BETÚN VIEJO-BETÚN REJUVENECEDOR EN RECICLADO A ALTAS TASAS

AUTORES

Julio del Pozo (Sorigué), Nuria Querol (Sorigué), Pedro Vergel (Sorigué)

1. INTRODUCCIÓN

Una de las incógnitas del reciclado a altas tasas, independientemente de los problemas de su fabricación en planta con la maquinaria disponible en la actualidad, es el tiempo de amasado para que la mezcla sea no solamente homogénea en cuanto a los áridos vírgenes con el RAP, sino sobre todo, del betún viejo con el rejuvenecedor, de tal forma que el nuevo betún que envuelva a los áridos del RAP sea razonablemente igual a que envuelve a los áridos vírgenes. Si este tiempo de amasado fuera elevado podría constituir un límite en el reciclado a altas tasas.

Los factores más evidentes que influyen en el problema son: el porcentaje de RAP, el grado de envejecimiento de betún, la cantidad de betún respecto de la nueva mezcla, la naturaleza de los áridos y la temperatura de fabricación.

Para intentar una aproximación a este fenómeno se ha diseñado el siguiente experimento en laboratorio:

-Se ha tomado un RAP de una mezcla muy envejecida.

-Se ha extraído y caracterizado el betún.

-Se ha formulado el rejuvenecedor correspondiente.

-Se han fabricado probetas de 10 cm de diámetro y 6,5 cm de altura, con granulometría S20, al 50 % y al 80% de RAP, y con tiempos de amasado de 30 seg, 60 seg y 180 seg.

-Se ha fabricado una probeta de referencia mezclando primeramente los betunes viejo, extraído del RAP, y betún rejuvenecedor, y posteriormente mezclando el betún resultante con el árido en blanco del RAP, y los áridos vírgenes.

-Se han obtenido las curvas de compactación en máquina giratoria.

-Se han hallado los módulos de rigidez a tracción indirecta.

2. CARACTERÍSTICAS DEL RAP

Se ha fresado material de una mezcla en rodadura con una antigüedad de 20 años fabricada con una granulometría D12 y un betún B 60/70. El material se ha pasado un molino de impacto para deshacer los bloques gruesos y conseguir una granulometría lo más parecida a la original.

Las características físicas del betún extraído son, Penetración, 9 dmm, y A&B, 88 ºC, y la viscosidad (Tabla 1):

TEMP ºC	B 50/70 cP	B VIEJO cP
100	5074	-
135	518	8500
150	256	3013
180	82	509

Tabla 1. Características del betún extraído del RAP

El betún extraído se ha caracterizado mediante barrido de frecuencias en DSR, tanto en su estado inicial, como después de RTFOT y PAV. En su estado inicial y RTFOT, a 58ºC, y con PAV, a 25ºC. Los resultados son los indicados en la Figura 1 y 2.

Se observa que el betún inicial y después de RTFOT, tanto en el comportamiento de las viscosidades, como en la variación del módulo G*, con el ángulo de fase, es similar, ya que el tratamiento de envejecimiento no ha representado cambios en un betún ya muy envejecido.

La granulometría, una vez pasado el material por el molino, es la representada en la Figura 3, correspondiente a una D12 de granulometría algo más abierta que la actual del PG3. También se ha representado el huso de la S20, que es la mezcla que se va a fabricar.

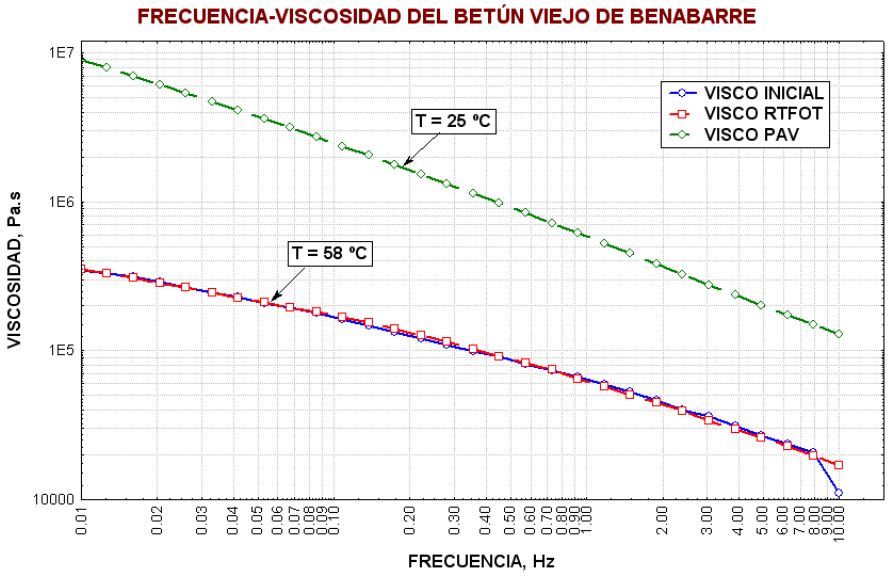


Figura 1. Caracterización reológica del betún

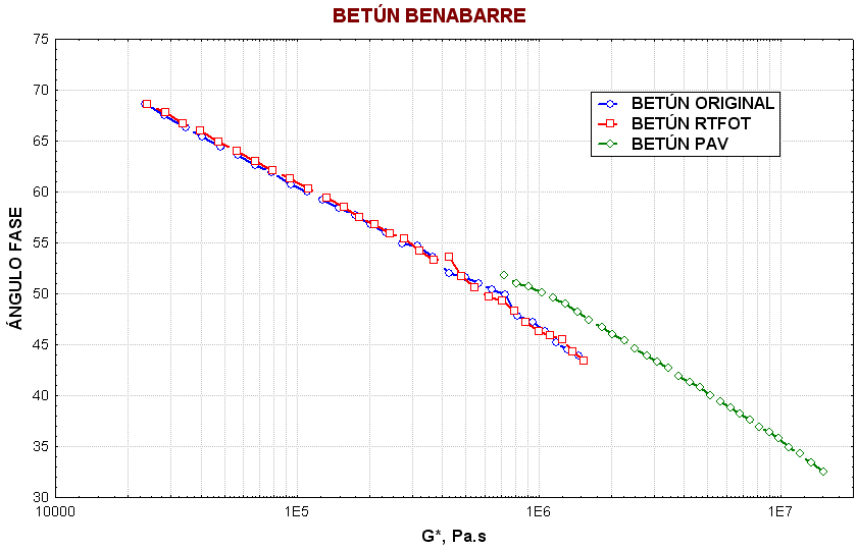


Figura 2. Caracterización reológica del betún

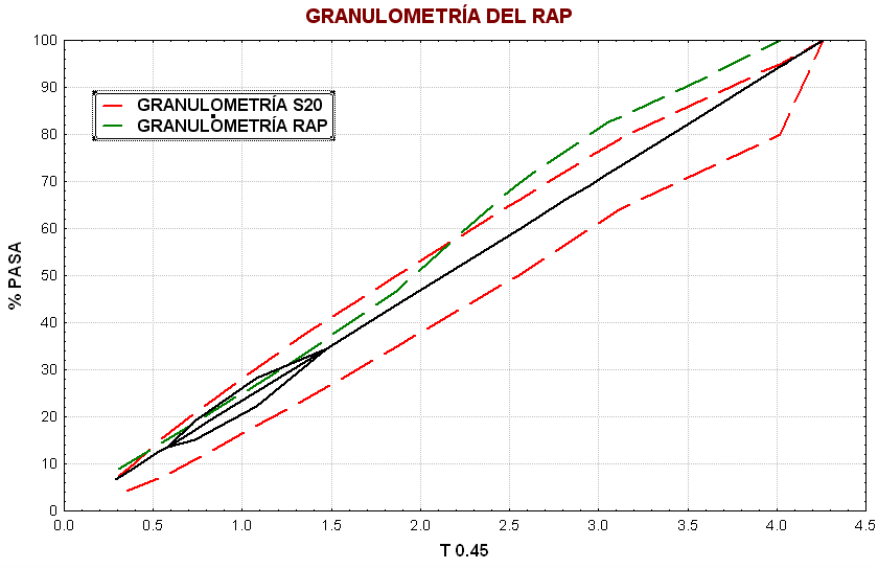


Figura 3. Granulometrías del RAP y de la mezcla a fabricar

3. FABRICACIÓN Y COMPACTACIÓN DE LAS MEZCLAS

Las mezclas tipo S20, R50 y R80, se han fabricado mediante la incorporación de un árido virgen en las proporciones adecuadas para que la relación betún viejo / betún rejuvenecedor sea el 50 % y el 80 %, por lo cual, dado que el RAP y la mezcla final no tienen la misma proporción de betún, queda en términos de mezcla, de la siguiente manera:

-Mezcla R50:

Tabla 2

RAP 50	% BETUN s/a	% RAP MEZCLA	% RAP BETUN	% BETÚN s/m
RAP	4.17	56.29	49.78	4.00
ARIDOS VIR	5.41	43.71	50.22	5.14
TOTAL	4.71	100.00	100.00	4.50

En este caso la proporción 50% sobre betún, supone una proporción del 56,29% de RAP.

-Mezcla R80:

Tabla 3

RAP 80	% BETUN s/a	% RAP MEZCLA	% RAP BETUN	% BETÚN s/m
RAP	4.17	90.00	80.00	4.00
ARIDOS VIR	9.89	10.00	20.00	9.00
TOTAL	4.71	100.00	100.00	4.50

En el caso del 80 % sobre betún, supone una proporción del 90 % de RAP.

Para fabricar las mezclas se trata de conseguir un betún B 50/70, lo que en términos de viscosidades supone que habrá que mezclar un betún B 50/70 con el aceite rejuvenecedor de que se dispone, de 0.3 Poises de viscosidad. Las proporciones están justificadas en el Anejo para cada una de las mezclas R50 y R80.

Los granulométricos del RAP, áridos vírgenes, y mezclas R50 y R80, son los siguientes:

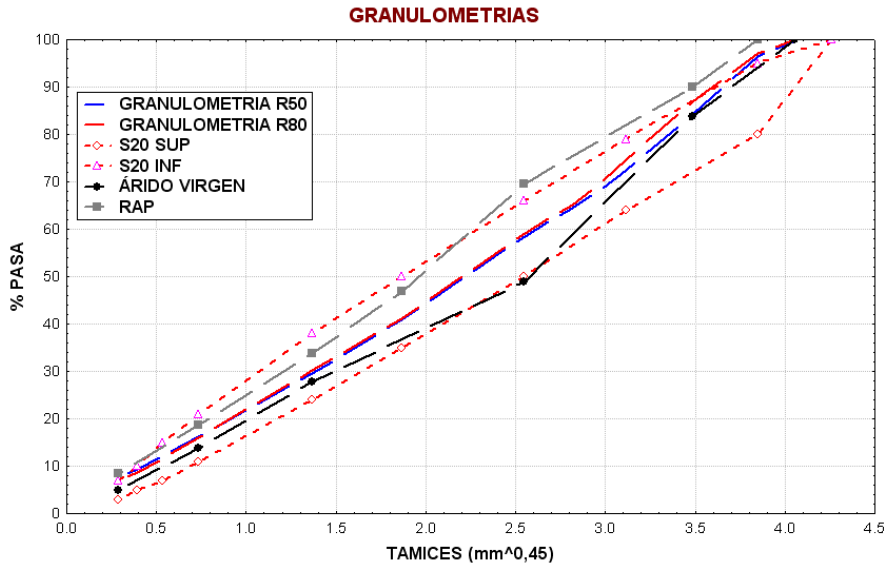


Figura 4. Granulometría comparada de áridos, RAP y mezclas

Las mezclas se han compactado en maquina giratoria hasta 200 vueltas con un ángulo de 0.82 º y presión de 600 kPa, obteniendo los diagramas de compactación de las Figuras 5 y 6, donde se han unificado las escalas de ordenadas para comparar mejor las densidades del R50 y R80. En ellas pueden verse dos tendencias distintas: mientras en la R50, a medida que el tiempo de mezclado ha

sido mayor la mezcla se ha compactado más fácilmente, en la mezcla R80 ocurre todo lo contrario, y en ambos casos, la mezcla de referencia, la que se supone que los betunes están presentes en su proporción en toda la mezcla, ha quedado situada entre las fabricadas con tiempos de mezclado de 60 y 180 seg.

Los resultados numéricos están detallados en el Anejo, y en los cuales se ha llamado D128 y D200 a las densidades a 128 y 200 ciclos, al igual que H128 y H200 son los huecos a los mismos ciclos.

Estos resultados tienen una interpretación complicada, por cuanto que era de esperar que la mezcla de referencia fuera la tendencia asintótica de las otras tres. Por otro lado las densidades del R50 han sido menores que las del R80.

Parece que el efecto lubricante del betún rejuvenecedor del R80, suma de un B 50/70 más el aceite, que aunque en menor cantidad, tiene una proporción de aceite muy alta y una viscosidad muy baja, ha tenido un efecto determinante en el comportamiento de las mezclas.

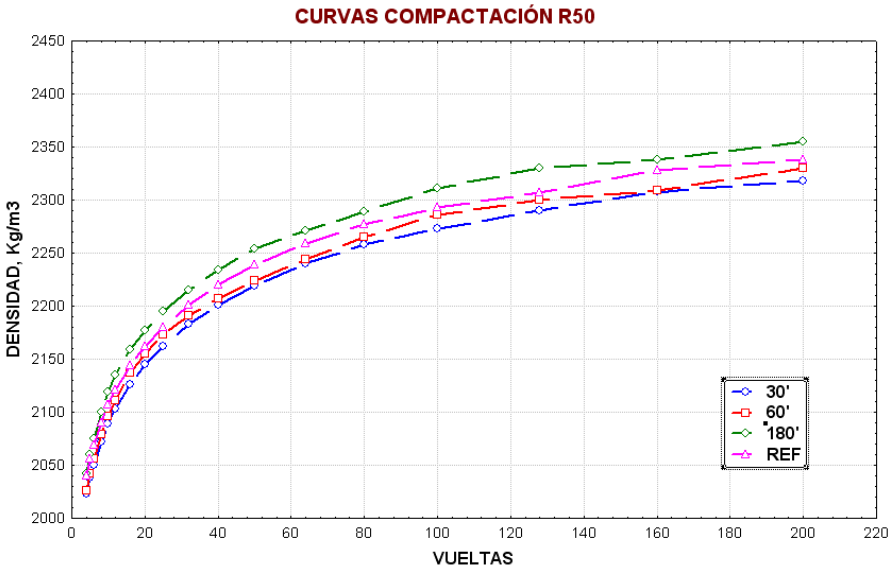


Figura 5.

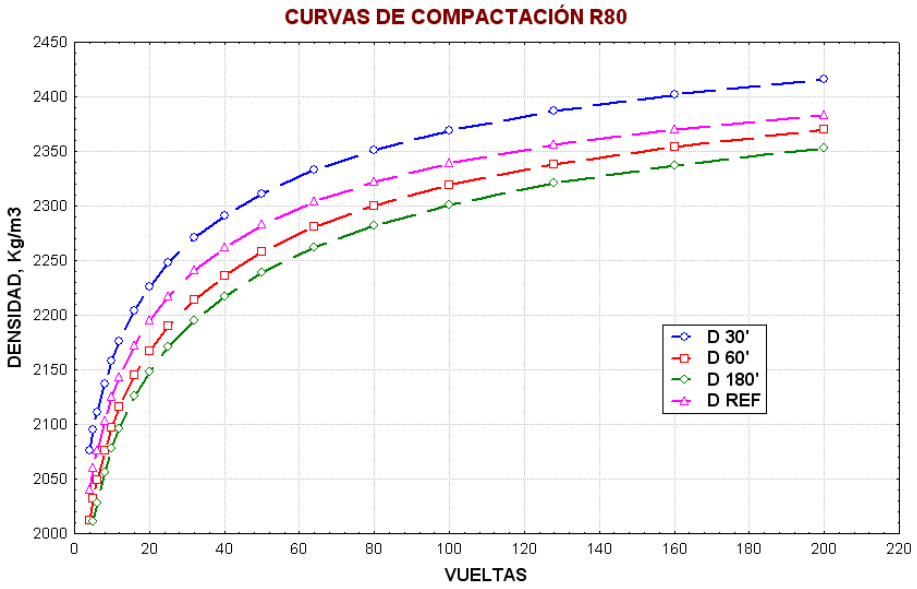


Figura 6

Una interpretación posible a este comportamiento es, que puesto que el betún rejuvenecedor del R50 está presente en mayor cantidad y con una mayor viscosidad (18% del 50% = 9% de aceite, respecto al 41 % de betún B 50/70, ver Anejo), haya estado dominando el betún viejo en los tiempos de mezclado mas bajos, haciéndose la mezcla progresivamente más compactable a medida que se ha mezclado el betún rejuvenecedor con más tiempo de amasado.

En el caso del R80, a pesar de que el betún rejuvenecedor está presente en menor cantidad, no se puede decir lo mismo del aceite (70% del 20% = 14% en el total, respecto del 6 % de betún B 60/70, ver Anejo), donde la baja viscosidad del mismo, con tan poca cantidad de B 50/70, domina sobre el RAP en los primeros momentos, endureciéndose la mezcla a medida que el tiempo de amasado es mayor. Estos dos procesos en su fase final, y por la misma razón, llegarían a ser inversos, justificando la posición en retroceso de la mezcla de referencia. En definitiva, el proceso desde su situación inicial, hasta la saturación, estaría condicionado por la diferente viscosidad de las fases, y por las cantidades relativas de las mismas.

Dado que las densidades máximas de las cuatro mezclas no son exactamente iguales, se han hecho intervenir los huecos analizando el espacio ciclos-huecos, pero la situación relativa de las curvas no ha cambiado.

4. MÓDULOS DE RIGIDEZ

Se han ensayado las probetas según la norma UNE-EN 12697-26 para conocer la evolución de los módulos de rigidez. La temperatura ha sido de 20 ºC. Las mismas probetas fabricadas para las curvas de compactación, se han utilizado para hallar los módulos de rigidez. Los resultados han están detallados en el Anejo final.

La representación gráfica de la distribución normal de cada serie de 30 segundos, 60 segundos, 180 segundos, y de referencia, en el R50 y R80 es la siguiente:

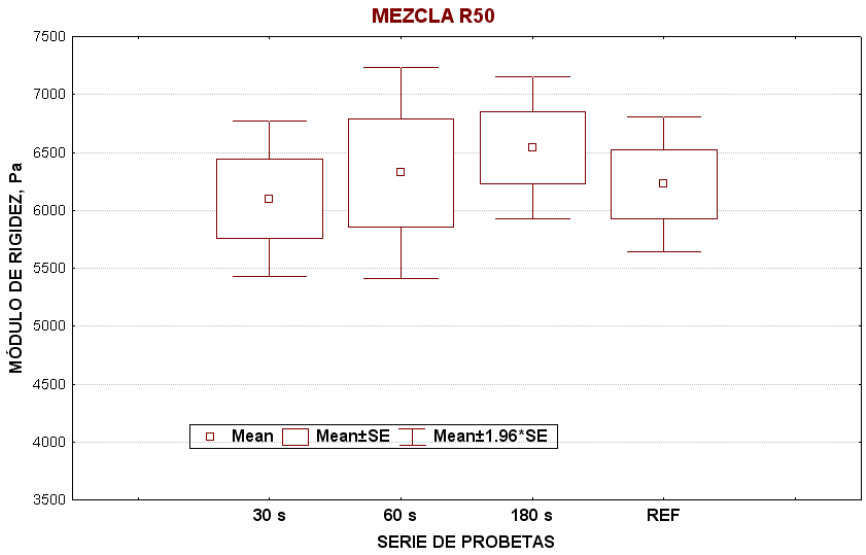


Figura 7. Distribución de módulos en la mezcla R50

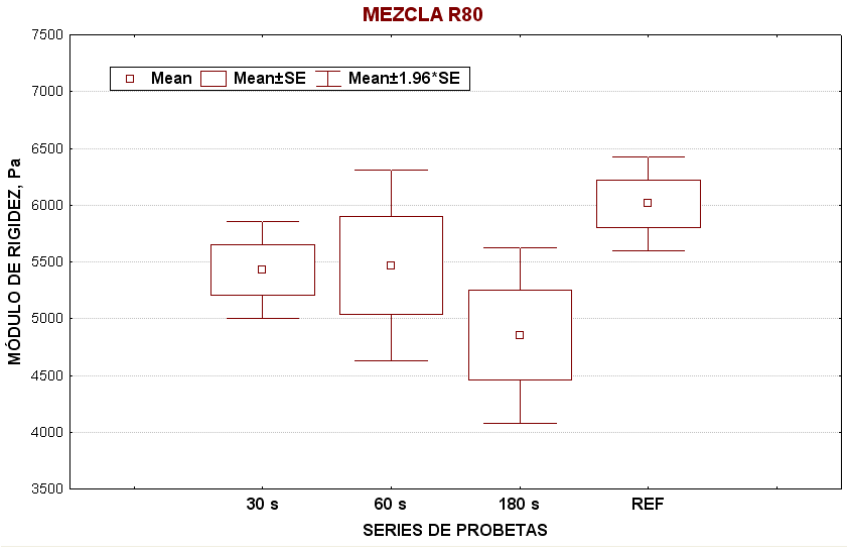


Figura 8. Distribución de módulos en la mezcla R80

Es también de interés representar la distribución de las densidades correspondientes a los módulos, es decir las finales a 200 ciclos. Se han unificado las escalas de las ordenadas para facilitar la comparación entre las dos mezclas estudiadas.

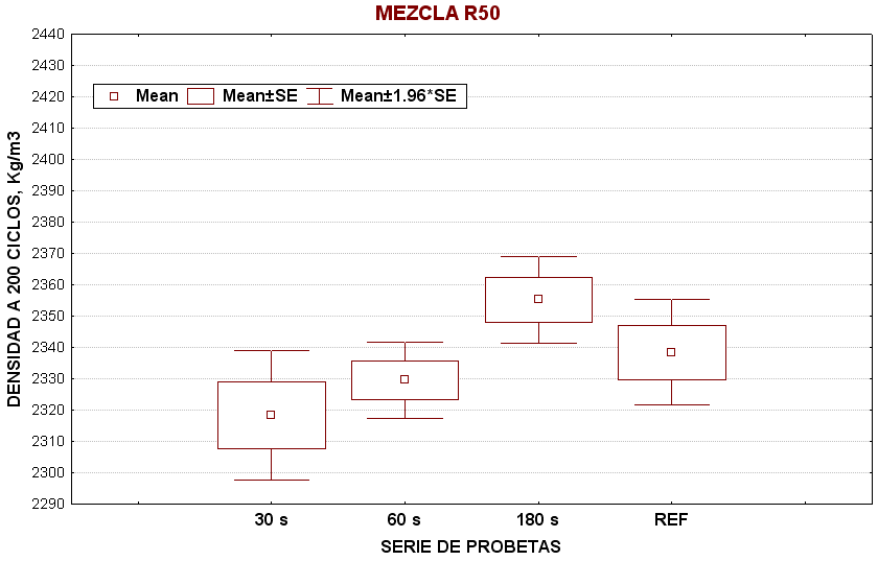


Figura 9. Distribución de densidades en la mezcla R50

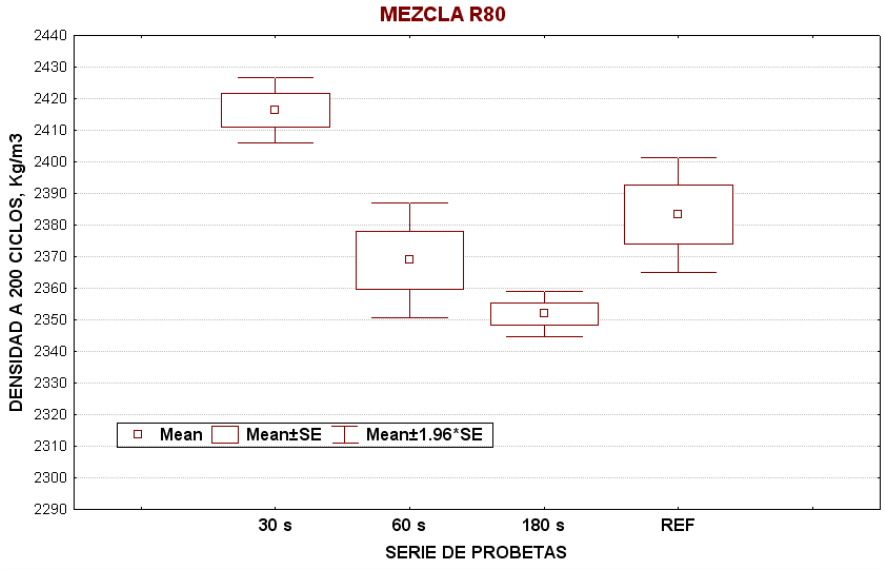


Figura 10. Distribución de densidades en la mezcla R80

Adicionalmente se ha efectuado un análisis de varianza (ANOVA) para ver si las distintas variables son o no sensibles al tiempo de amasado, Tablas 4 y 5, y donde puede verse que solamente el módulo de rigidez, en el R50, es indistinguible en los cuatro tipos de mezcla, Todas las demás variables han resultado sensibles al tiempo de amasado incluso el módulo de rigidez de la mezcla R80.

Tabla 4. Tiempos de amasado R50

R50	SS Effect	df Effect	MS Effect	SS Error	df Error	MS Error	F	p
D128	7773.9	3	2591.3	18310	32	572	4.529	0.009
D200	6548.6	3	2182.9	19908	32	622	3.509	0.026
H128	17.4	3	5.8	29	32	1	6.393	0.002
H200	15.3	3	5.1	32	32	1	5.176	0.005
M RIGIDEZ	870704.5	3	290234.8	35591336	31	1148108	0.252794	0.858734

Los valores en rojo indican significancia menor del 5 %, ($p<0.05$, rechazo de la hipótesis nula H0)

Tabla 5. Tiempos de amasado R80

R80	SS Effect	df Effect	MS Effect	SS Error	df Error	MS Error	F	p
D128	22663	3	7554	21172	35	604.9	12.488	0.000
D200	20823	3	6941	20364	35	581.8	11.929	0.000
H128	85	3	28	33	35	0.9	29.850	0.000
H200	81	3	27	32	35	0.9	29.425	0.000
M RIGIDEZ	14149226	3	4716409	31703381	32	990730.6	4.761	0.007

Si el análisis de varianza se hace respecto al tipo de mezcla, se obtienen los valores de la Tabla 6, que indican que el conjunto de todas las series, independientemente del tiempo de amasado, son sensibles al porcentaje de RAP, y la representación gráfica de las distribuciones de las variables M RIGIDEZ y D200 de los dos tipos de RAP, se indican en las Figuras 11 y12.

Tabla 6.Tiempos de amasado en el conjunto R50 y R80

R80 y R50	SS Effect	df Effect	MS Effect	SS Error	df Error	MS Error	F	p
D128	37991	1	37991	69919	73	958	39.665	0.000
D200	40047	1	40047	67644	73	927	43.218	0.000
H128	41	1	41	164	73	2	18.187	0.000
H200	43	1	43	159	73	2	19.889	0.000
M RIGIDEZ	7825680	1	7825680	82314648	69	1192966	6.560	0.013

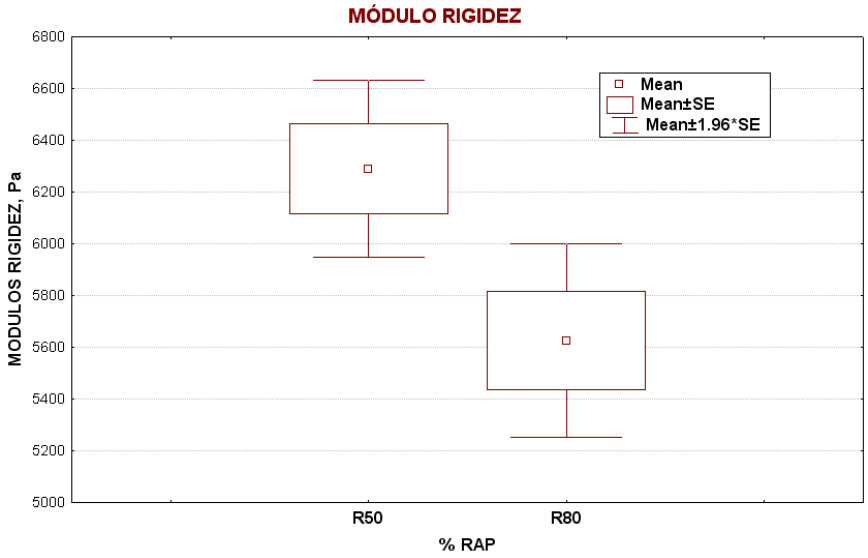


Figura 11. Distribución de la variable M RIGIDEZ

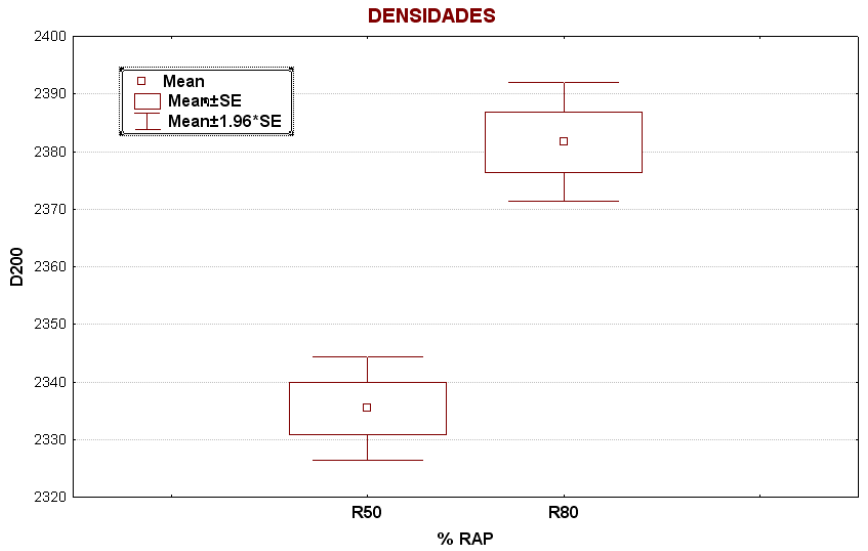


Figura 12. Distribución de la variable D200

5. CONCLUSIONES

Las conclusiones del trabajo son difusas y evidencian que parte de la dispersión de resultados pone de manifiesto la heterogeneidad de unas probetas (D=10 cm; H = 6,5 cm), que procediendo de amasadas concretas y cuidadosamente dosificadas, parecen pequeñas respecto del tamaño máximo del árido. No obstante, en base a los resultados obtenidos se pueden extraer claramente las siguientes tendencias:

Las densidades conseguidas en el R50 han sido inferiores al R80, y su variación en función de los tiempos de amasado, han sido crecientes en el primer caso y decrecientes en el segundo. En principio, y en ausencia de mejores criterios, se puede aceptar la hipótesis descrita en el presente estudio.

Los módulos de rigidez, también han sido superiores y crecientes con el tiempo de amasado en el R50, e inferiores, decrecientes y más inestables en el R80.

Los módulos de rigidez del R50 se han mantenido más uniformes con el tiempo de amasado que los del R80.

Se evidencia la mayor inestabilidad en densidades y módulos en el R80, aún cuando, en las mezclas de referencia, donde la mezcla de betunes es perfecta, en el R80 se hayan conseguido mayores densidades y módulos que en la R50.

El tiempo de amasado puede ser de 30 a 60 segundos, mejor este último valor, en las mezclas tipo R50, que aún mejorando en 180 segundos, no se justifica en su comparación con la mezcla de referencia. El tiempo de amasado queda más indeterminado en las R80, donde también los 60 segundos son una buena opción, pero en un escenario más inestable donde sería necesario profundizar más, añadiendo ensayos de rotura a tracción indirecta y susceptibilidad al agua.

ANEJO

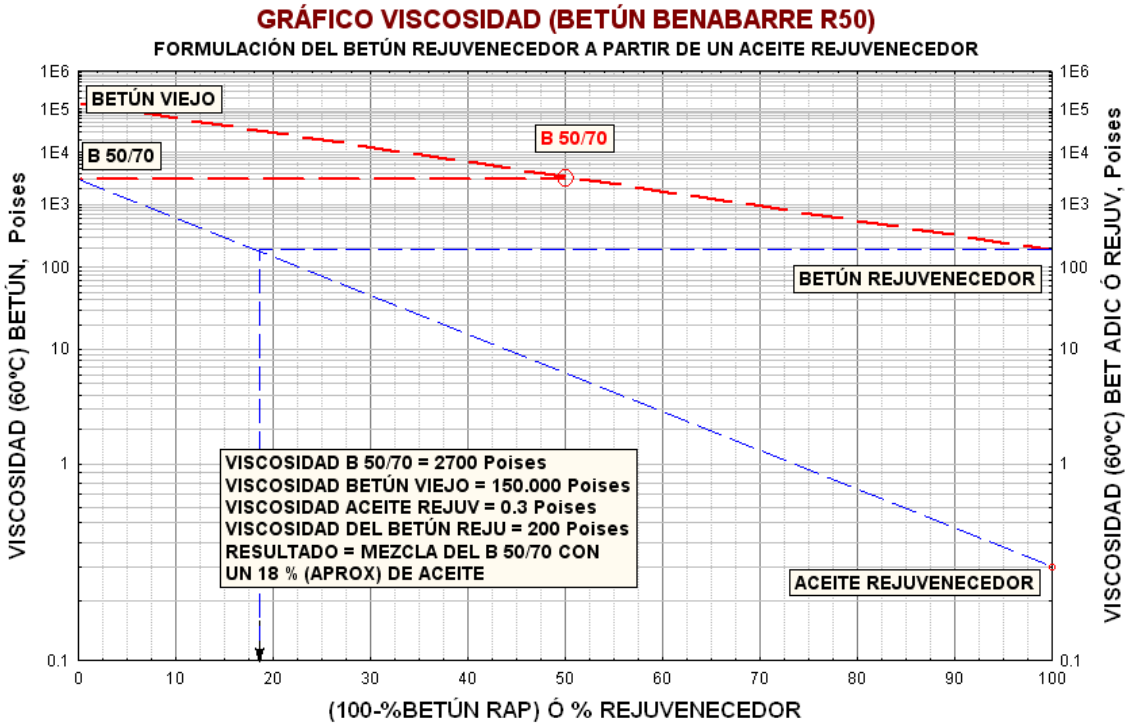


GRÁFICO VISCOSIDAD (BETÚN BENABARRE R50)
FORMULACIÓN DEL BETÚN REJUVENECEDOR A PARTIR DE UN ACEITE REJUVENECEDOR
BETÚN VIEJO
B 50/70
B 50/70
BETÚN REJUVENECEDOR
ACEITE REJUVENECEDOR
VISCOSIDAD B 50/70 = 2700 Poises
VISCOSIDAD BETÚN VIEJO = 150.000 Poises
VISCOSIDAD ACEITE REJUV = 0.3 Poises
VISCOSIDAD DEL BETÚN REJU = 200 Poises
RESULTADO = MEZCLA DEL B 50/70 CON
UN 18 % (APROX) DE ACEITE
VISCOSIDAD (60ºC) BETÚN, Poises
VISCOSIDAD (60ºC) BET ADIC Ó REJUV, Poises
(100-%BETÚN RAP) Ó % REJUVENECEDOR

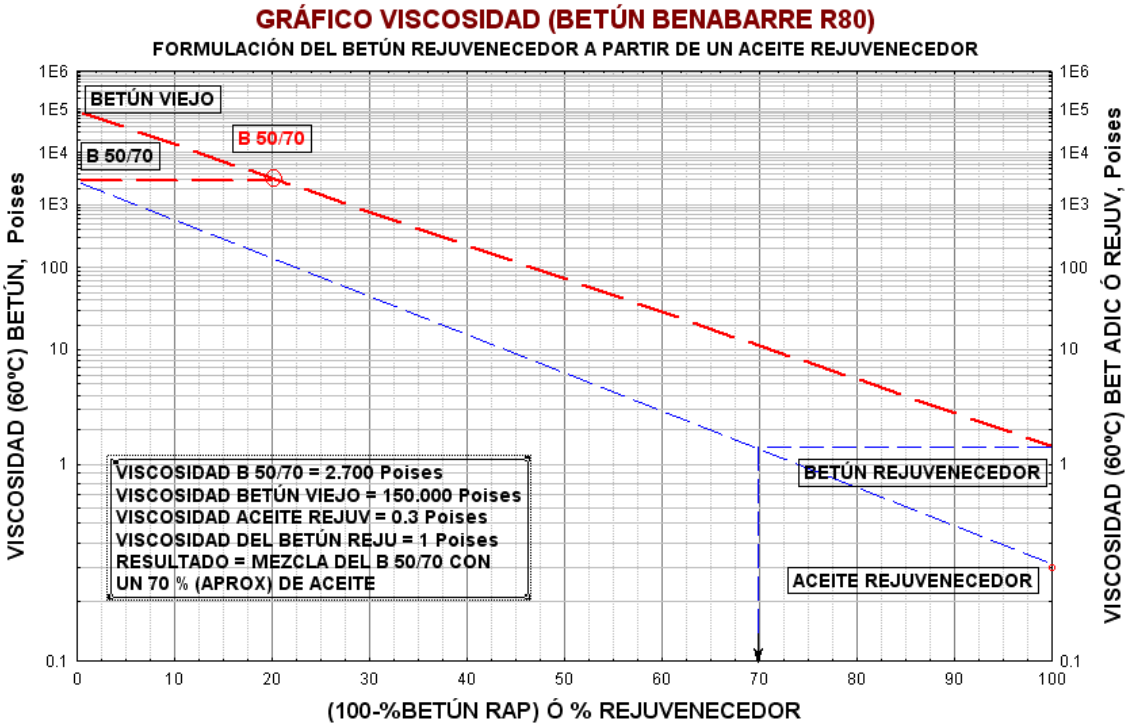


GRÁFICO VISCOSIDAD (BETÚN BENABARRE R80)
FORMULACIÓN DEL BETÚN REJUVENECEDOR A PARTIR DE UN ACEITE REJUVENECEDOR
BETÚN VIEJO
B 50/70
B 50/70
BETÚN REJUVENECEDOR
ACEITE REJUVENECEDOR
VISCOSIDAD B 50/70 = 2.700 Poises
VISCOSIDAD BETÚN VIEJO = 150.000 Poises
VISCOSIDAD ACEITE REJUV = 0.3 Poises
VISCOSIDAD DEL BETÚN REJU = 1 Poises
RESULTADO = MEZCLA DEL B 50/70 CON
UN 70 % (APROX) DE ACEITE
VISCOSIDAD (60ºC) BETÚN, Poises
VISCOSIDAD (60ºC) BET ADIC Ó REJUV, Poises
(100-%BETÚN RAP) Ó % REJUVENECEDOR

DENSIDAD 128 c (Kg/m3)	DENSIDAD 200 c (Kg/m3)	HUECOS 128 c (%)	HUECOS 200 c (%)	MÓDULO RIGIDEZ Pa	TIEMPO AMASADO seg
2330	2358	7.47	6.35	6917	30 s
2338	2368	7.15	5.96	6064	30 s
2303	2329	8.54	7.51	6326	30 s
2290	2318	9.05	7.94	6318	30 s
2252	2279	10.56	9.49	4644	30 s
2306	2335	8.42	7.27	4164	30 s
2262	2292	10.17	8.98	7073	30 s
2257	2284	10.37	9.29	6866	30 s
2268	2302	9.93	8.58	6525	30 s
2277	2309	9.36	8.08	5461	30 s
2299	2330	8.48	7.25	6077	60 s
2306	2343	8.20	6.73	7087	60 s
2317	2350	7.76	6.45	7516	60 s
2286	2308	9.00	8.12	5184	60 s
2280	2311	9.24	8.00	7192	60 s
2332	2356	7.17	6.21	3491	60 s
2308	2341	8.12	6.81	7249	60 s
2297	2318	8.56	7.72	7648	60 s
2362	2375	5.86	5.34	6255	180 s
2336	2345	6.90	6.54		180 s
2340	2392	6.74	4.66	6948	180 s
2346	2351	6.50	6.30	4625	180 s
2345	2359	6.54	5.98	7217	180 s
2322	2357	7.45	6.06	6539	180 s
2323	2355	7.41	6.14	7372	180 s
2309	2349	7.97	6.38	7094	180 s
2284	2314	8.97	7.77	6266	180 s
2283	2309	9.08	8.04	6295	REF
2332	2369	7.13	5.66	4538	REF
2342	2385	6.73	5.02	6023	REF
2304	2341	8.24	6.77	5628	REF
2311	2337	7.96	6.93	6242	REF
2287	2307	8.92	8.12	5809	REF
2318	2347	7.69	6.53	6859	REF
2290	2325	8.80	7.41	7518	REF
2299	2326	8.44	7.37	7121	REF

LÍMITES TEÓRICOS Y PRÁCTICOS EN EL RECICLADO EN CALIENTE EN ALTAS TASAS

AUTORES

José Luis Peña (Agrupación Fénix AIE), Julio del Pozo (Sorigué) Jesus Felipo (Pavasal) Nuria Querol (Sorigué), José Ramón López (Pavasal).

RESUMEN

Hasta hace no muchos años, el desarrollo de las técnicas de reciclado se ha basado en análisis económicos o de flexibilidad/facilidad de ejecución de las obras. Las consideraciones ambientales tenían cabida de una forma intuitiva, sin saber exactamente qué implicaciones tenía el uso de fresado en la fabricación de mezclas bituminosas.

El desarrollo de metodologías de cuantificación del impacto ambiental ha permitido obtener una imagen más completa de las implicaciones derivadas del uso de las técnicas de reciclado. Junto a estas evaluaciones medioambientales, en el Proyecto Fénix se han obtenido interesantes resultados relativos al proceso de mezclado, interacción con los ligantes rejuvenecedores, características mecánicas de las mezclas con altas tasas de RAP etc.

A la luz de estos resultados resulta interesante realizar una recapitulación de cómo ha evolucionado la técnica de reciclado en caliente y proponer nuevos criterios para el diseño y fabricación de mezclas en caliente con altas tasas de RAP.

1. INTRODUCCIÓN

El reciclado de pavimentos asfálticos incluye una serie de tecnologías ampliamente difundidas a nivel mundial y con una cada vez mayor aceptación.

Las ventajas de reciclar se han valorado, especialmente, desde un punto de vista económico, habiendo sido éste el motor que ha empujado su desarrollo. Sin embargo, a pesar del desarrollo y proliferación de herramientas de análisis de impacto medioambiental la evaluación de la “bondad” del reciclado de pavimentos no es tan sencilla como en el caso de su análisis económico.

En el Proyecto Fénix se está utilizando el término sostenibilidad de una forma consistente, no dejándolo en un término manido de declaración de intenciones, sino como principio de diseño o selección de las temáticas objeto de estudio.

En el caso concreto del reciclado de pavimentos el análisis de sostenibilidad se ha realizado de forma global sobre la vida de la carretera y de forma más específica en el caso del reciclado en caliente.

Para el análisis global, aunque no de forma específica, se ha cuantificado el impacto de las diversas fases de vida de una carretera (construcción y conservación), observándose que los mayores impactos provienen del uso de materias primas. Por lo tanto, todo tipo de proceso que reduzca su uso mejorará el impacto global del sistema, como es el caso del reciclado en caliente.

El objetivo de este trabajo es intentar dar una respuesta concreta a una serie de cuestiones que no han sido bien resueltas hasta la fecha. Entre las mismas podríamos destacar:

¿Qué es más ventajoso, utilizar RAP en altas tasas en unas pocas obras o generalizar el uso del RAP a bajas tasas en la mayoría de las fabricaciones de mezclas bituminosas en caliente?

¿Cuáles son los límites o condicionantes que nos empujen a usar el RAP en las mezclas bituminosas en altas o en bajas tasas?

¿El reciclado en caliente genera mezclas de menor calidad que las mezclas bituminosas hechas con áridos vírgenes (downcycling) o, por el contrario, podemos igualar o mejorar la calidad de estas últimas?

¿Debemos hablar de un diseño unificado de mezclas fabricadas con RAP o debemos considerar su especifidad basada en su posición dentro del firme?

¿Hasta qué porcentaje de RAP podemos usar betunes convencionales como agentes regenerantes del ligante y cuándo debemos usar ligantes específicos?

¿A qué tratamientos debemos someter el RAP para maximizar la calidad de las mezclas fabricadas con él?

¿Cómo de efectivo es el proceso de mezclado entre el betún del RAP y el nuevo ligante incorporado?

¿Cuáles son los porcentajes máximos recomendables de RAP que se pueden incorporar en una mezcla bituminosa?

2. RECICLADO EN CALIENTE. GENERALIDADES

Bajo el término reciclado en caliente podemos encontrar diversas formas de tecnologías que se diferencian por dos consideraciones fundamentales: la tasa de material reciclado RAP que se pretende incorporar en la mezcla y la ubicación de la unidad de producción (in situ o en planta). Veamos las implicaciones que se derivan de estos dos factores.

En numerosos países el empleo de RAP en tasas inferiores al 20% no está considerado propiamente dicho como reciclado en caliente, ya que no se tienen en cuenta las características del betún contenido en el RAP, sino que tan solo permite reducir la cantidad de betún a aportar, respecto a una mezcla hecha con áridos vírgenes, supuesto que las características mecánicas de la mezcla final obtenida

cumpla las especificaciones finales exigidas a cada tipo de mezcla en las que se emplee.

En el caso concreto de España, la Orden Circular 8/01 sobre reciclado de firmes, en el apartado referido a reciclado en caliente en central, especifica que una mezcla bituminosas reciclada es aquella que contiene entre un 10 y un 50% en peso de RAP.

El hecho de que a bajas tasas no se deban realizar estudios específicos sobre el ligante contenido en el RAP no debe ser óbice para tener en cuenta algunas consideraciones sobre qué es el RAP y qué características tiene.

El proceso de fresado de material bituminoso puede generar partículas de tamaño relativamente variable en función de las condiciones de operación de las fresadora, del estado del pavimento y del tipo de mezcla asfáltica.

En el trabajo publicado por Valdés et al. [1] se analizaron las variabilidades generadas por el uso de RAP clasificado y sin clasificar, llegándose a la conclusión de que era muy ventajoso separar el RAP en dos fracciones: 0/8 mm y 8/25 mm. Este estudio fue realizado en mezclas bituminosas con contenidos de RAP entre el 40 y el 50.

La causa principal de la variabilidad radica en que las partículas más finas concentran la mayor parte del betún del fresado, por lo que es especialmente crítico el control de esta fracción, pudiendo llegar a duplicar el contenido de betún de las fracciones 0/8 mm respecto a la fracción 8/25.

Otra consideración importante al usar cantidades importantes de RAP es tener en cuenta su estructura interna: las partículas de RAP son un conglomerado de árido grueso, árido fino, filler y betún que bajo la acción del calor aportado por la planta de fabricación y el contacto con áridos vírgenes calientes se pueden desagregar parcialmente.

No existen estudios detallados que correlacionen el tamaño de las partículas de RAP con el grado de desagregación que sufrirán durante los procesos de calentamiento, mezclado, extensión y compactación, pero parece lógico suponer que a mayor tamaño de las partículas de RAP las probabilidades de desagregación aumenten. Igualmente, cuando el betún del RAP esté muy oxidado, será más difícil el proceso de desagregación y las partículas de RAP tenderán a comportarse como una partícula “virtual de árido” (Figura 1). En general, puesto que los áridos que componen las partículas de RAP son sensiblemente de menor tamaño que los áridos originales debido a la acción mecánica del fresado, para conseguir una composición granulométrica adecuada de la mezcla final se aconseja utilizar al menos una fracción relativamente gruesa del RAP.

Diversos trabajos como los de McDaniel et al, 2006 [2] o TRC (2002) [3] proponen metodologías para optimizar la granulometría de mezclas que incorporen RAP en su composición.

La consideración de las partículas de RAP como agregados o como sus componentes individuales también tiene su importancia cuando buscamos maximizar la calidad de las mezclas. Procedimientos de diseño volumétrico de mezclas, como es el caso del método Bailey [3] demuestran la importancia de la dosificación correcta de partículas de tamaño fino que actúan como relleno de los huecos de las partículas más gruesas. Si nos excedemos en la cantidad de partículas pequeñas, en lugar de rellenar huecos, y por tanto, aportar rigidez y compacidad a la mezcla, pueden actuar como cuñas separadoras entre las partículas de mayor tamaño.

Por lo tanto, parece necesario poder distinguir en qué casos las partículas de RAP pueden ser clasificadas en un grupo o en otro. Si bien es cierto que a base de realizar numerosas mezclas podemos llegar a optimizar el porcentaje de RAP (en incluso qué fracciones del RAP nos interesan más), el poder predecir de una forma analítica el comportamiento parece más adecuado que recurrir al método de prueba y error.

También hemos de tener en cuenta, que a pesar de que la interacción entre el betún viejo y el nuevo puede considerarse total, como se explica en el siguiente apartado, el filler que forma parte del mástico del RAP es difícil que pueda distribuirse dentro del nuevo ligante, por lo que la cantidad total de filler que debe incluir la mezcla debe estudiarse con bastante precaución, especialmente en las mezclas con altos porcentajes de RAP.

3. PROCESO DE INTERACCIÓN ENTRE EL RAP Y EL NUEVO LIGANTE

Debido al alto grado de envejecimiento que suele tener el betún de los pavimentos en los que se procede a operaciones de fresado surge la cuestión relativa a si su consideración pasa a ser un, en terminología anglosajona, “black rock”, es decir una partícula asimilable a árido, o por el contrario es susceptible de disgregación por el efecto combinado de la temperatura y la mezcla con el ligante nuevo aportado. En trabajos como el del NCHRP [4] , Al-Qadi [5], Mac Daniel et al.[6], Oliver [7] y Stephens et al. [8] los datos experimentales indican que el 100% del betún pueden recuperarse para ser seguir desempeñando funciones de ligante bituminoso, por lo que los criterios de diseño de mezclas bituminosas que contengan RAP han de tener en cuenta esta circunstancia.

Del Pozo et al. [6] han evaluado la interacción entre RAP y los nuevos ligantes en tasas de reciclado de hasta el 80%, en las que se comprueba una plena interacción entre el nuevo ligante y el ligante oxidado contenido en el RAP, sin embargo han encontrado efectos contradictorios al evaluar la influencia de los tiempos de mezclado en el laboratorio, que podrían explicarse por el proceso de interacción del agente rejuvenecedor sobre el ligante oxidado del RAP.

Esta incorporación progresiva del nuevo ligante en la matriz del antiguo es el fenómeno que Huang et al [9] describen y que explicaría la razón por la que las mezclas con RAP poseen una resistencia a la fatiga mejorada respecto a las mezclas originales, como describe Oliver 2001 [7]. Similares resultados se han encontrado en los ensayos realizados dentro del Proyecto Fénix con la particularidad de que el

diseño de los ligantes de aportación puede condicionar las prestaciones de la mezcla reciclada. Este tema se describe con más amplitud en el capítulo relacionado con prestaciones comparativas de las mezclas recicladas.

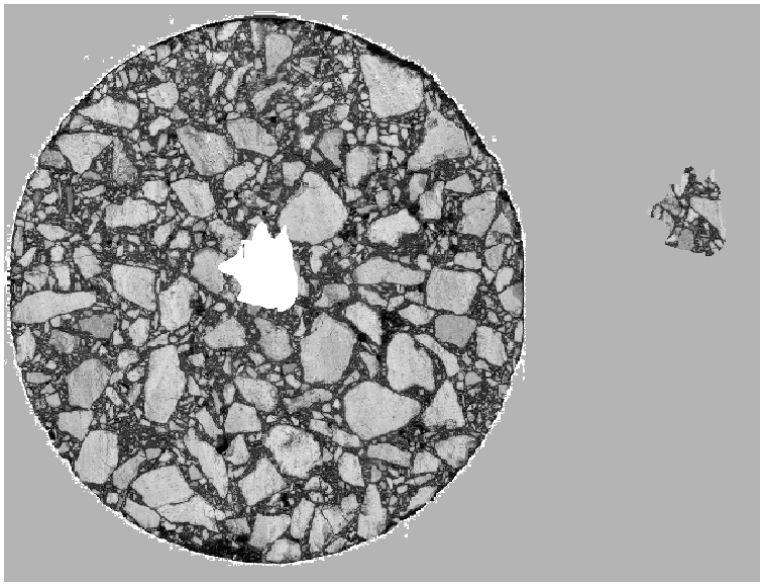


Figura 1. Simulación de la generación de una partícula de RAP a partir de la masa de mezcla asfáltica

Por lo tanto, podemos considerar como criterio válido de diseño que el 100% del betún contenido en el RAP es potencialmente aprovechable. Una cuestión adicional a resolver es qué tipo de ligante debemos adicionar para conseguir una mezcla bituminosa con las características deseadas.

Para resolver esta cuestión debemos tener en cuenta tres cuestiones fundamentales: cuánto RAP vamos a incluir en la formulación, el grado de oxidación del betún contenido en el RAP (aunque ya veremos que en caso de reciclado en baja tasa éste no es un criterio crítico) y la "funcionalidad" de la capa donde se vaya a extender la mezcla reciclada: capa de base, intermedia o, incluso, rodadura. Esta última cuestión es de máxima importancia, ya que en los diseños modernos de firmes destinados a maximizar la durabilidad la funcionalidad específica de cada capa exige el uso de ligantes apropiados. Así en las capas de base el uso de ligantes flexibles y con alta capacidad de autorreparación (healing) es altamente ventajoso, mientras que en las capas intermedias el uso de ligantes que proporcionan alta rigidez y capacidad estructural es lo más adecuado.

En la Orden Circular 8/2001 el criterio estipulado para seleccionar el ligante es doble: o bien obras de más de 70000 m2 o que el porcentaje de RAP sea superior al 25%. En ambos casos el ligante de aportación debe tener unas características tales que una vez mezclado con el betún del RAP resulte un ligante de las características especificadas para la mezcla bituminosa. Por tanto, la normativa española parte del principio de completa disposición del ligante envejecido.

Sin embargo, al no existir en la normativa española una exigencia de características especiales a las mezclas bituminosas en función de su posición en el firme, el criterio de diseño de ligantes de aportación se simplifica, buscando tan sólo el "recomponer" betunes de grado genérico como pueden ser el B 35-50 o el B 50-70.

En la normativa AASHTO M 323 (2007) se distinguen tres casuísticas en la elección del ligante cuando una mezcla bituminosa contiene RAP:

-Hasta el 15% de RAP (en peso) no se requiere ningún cambio en el tipo de ligante.

-Entre el 16 y el 25% se exige utilizar un betún de mayor penetración (un escalón en la escala PG).

-Si la cantidad de RAP es superior al 25% hay que realizar estudios específicos para determinar qué grado de ligante es el adecuado, lo que exige recuperar y caracterizar el ligante procedente del RAP.

En el caso de mezclas con altos contenidos de RAP, en lugar de betunes blandos puede ser ventajoso el uso de agentes rejuvenecedores. Éstos son compuestos químicos en cuya composición predominan aquellas familias de productos químicos que han "desaparecido" del betún contenido en el RAP por efecto de la oxidación.

La norma ASTM D4887 (2003) o el Asphalt Recycling Guide Austroads (2007) definen productos y reglas de mezclado para seleccionar el agente rejuvenecedor más apropiado.

En estudios como los de Shen et al (2007) encontraron que el empleo de agentes rejuvenecedores mejoraba las propiedades mecánicas de las mezclas recicladas, en comparación con mezclas en las que se utilizaron betunes blandos. Incluso afirmar que pueden incrementar en un 10% el uso de RAP.

Kadar (1996) encontró que el proceso de incorporación del agente rejuvenecedor dentro del betún envejecido del RAP no se produce de forma completa en el proceso de fabricación de la mezcla bituminosa, sino que el proceso de difusión conlleva un periodo entre 3 y 6 meses, de acuerdo a los datos de módulo y fluencia.

4. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS RECICLADOS EN ALTA TASA.

Aunque este apartado se trata en profundidad en la primera publicación de esta Monografía, no conviene olvidar que los resultados obtenidos en numerosos trabajos confirman que se pueden obtener mezclas bituminosas de calidad equiparable al de las mezclas bituminosas fabricadas con árido vírgenes. Es más, en algún aspecto, como la sensibilidad al agua, se ha confirmado una sensible mejoría, posiblemente debida a que en el proceso de mezclado gran parte de los áridos finos ya están bajo la forma de "agregados de árido/filler/betún" por lo que el proceso de incorporación del filler dentro del betún para formar el mástico es más sencillo.

En el Proyecto Fénix se han efectuado estudios de seguimiento de algunas de las obras más significativas en las que se ha empleado reciclado en alta tasa. Los resultados obtenidos muestran que hasta el momento no se ha producido una evolución significativa de las propiedades de las mezclas bituminosas empleadas en dichas obras desde el día de su construcción.

Finalmente, los estudios realizados sobre ligantes por Del Pozo et al (2008) sobre envejecimiento de betunes y en los que se apuntaba la necesidad de diseñar betunes o ligantes rejuvenecedores específicos para las mezclas bituminosas en función de su funcionalidad dentro del pavimento (capa de base resistente a la fatiga, capas intermedias estructurales etc.) han sido refrendados con estudios sobre mezclas asfálticas, confirmando la importancia de la elección del ligante de aportación.

5. EMPLEO DE RAP EN ALTA O EN BAJA TASA

Respecto a la viabilidad y oportunidad de usar el RAP en altas o bajas tasas, conviene tener en cuenta las cifras globales de mezclas bituminosas fabricadas y las cantidades de RAP utilizadas. Según los datos de EAPA correspondientes al año 2009 (Tabla 1), en el caso de España tan solo se reciclan 1.850.000 t de RAP, lo que supone un 5% del conjunto de las mezclas bituminosas en caliente fabricadas en España.

Country	Available reclaimed asphalt (tonnes)	% of available reclaimed asphalt used in				% of the new hot and warm mix production that contains reclaimed material
		Hot and warm recycling	Half warm recycling	Cold recycling	Unbound layers	
Austria	400 000	85		5	10	
Belgium	1 300 000	57				44
Czech Republic	1 500 000	20	0	30	30	10
Croatia	13 000			100		
Denmark	307 000	55	0	0	45	46
Finland	500 000					
France	7 053 000	41				6,8
Germany	14 000 000	82			18	60
Greece	0					
Great Britain	4 000 000					
Hungary	3 000	66			33	
Iceland	30 000				25	6,0
Ireland	100 000	30				1,0
Italy	12 000 000	20				
Netherlands	4 500 000	74				72
Norway	763 000	12	≈ 0	12	58	7,3
Poland	1 100 000	5				0,2
Romania	13 000	60	10	15	3	12
Slovenia	15 360	30	20	50		
Spain	1 850 000	52	9	15	24	9
Sweden	1 000 000	75	10	10	5	50
Switzerland	1 200 000	50		50		17
Turkey	1 069 600	3			97	1
Japan						70,7

Tabla 1. Consumo de RAP en diversos países (fuente EAPA)

En comparación con otros países europeos, esta cantidad es realmente pequeña y muestra qué lejos estamos de un objetivo de aprovechamiento al 100% del RAP. Recordemos que el RAP no es un subproducto sino una materia prima de primera calidad mucho más valiosa que los áridos.

Con un nivel de aprovechamiento del RAP tan bajo se comprende la escasez de obras en las que se utilice el RAP en altas tasas pero, incluso, su bajo empleo en bajas tasas.

Ya se ha citado que el betún procedente del RAP puede considerarse como ligante dentro de la nueva mezcla bituminosa, por lo que la cantidad de betún a incorporar será tanto menor cuanto mayor sea la cantidad de RAP. Desde un punto de vista meramente económico, es evidente que el empleo de RAP permite reducir el coste total de las mezclas, tanto por la menor cantidad de betún de aportación como por la reducción de consumo de áridos vírgenes.

Por supuesto que el empleo de RAP lleva asociados ciertos sobrecostes, tanto económicos como medioambientales, como son: el fresado del pavimento a reciclar (aunque esta operación suele ser imprescindible tanto si se aprovecha el RAP como si no), el transporte del fresado hasta la planta de fabricación, la necesidad de usar plantas asfálticas adaptadas y el mayor consumo de combustible exigido en el proceso de fabricación, debido fundamentalmente a la mayor cantidad de agua que suele acumular el RAP en comparación con los áridos vírgenes. Esta última circunstancia no siempre se tiene que dar, especialmente en épocas estivales.

La variable principal que va a determinar la oportunidad del uso del RAP en un porcentaje determinado es la logística de cada obra. Así, en obras de cierta importancia situadas en zonas mal comunicadas y lejos de instalaciones fijas de fabricación de mezclas bituminosas, el uso de plantas específicas de reciclado en alta tasa puede ser la solución óptima.

El caso opuesto puede ser el de las plantas asfálticas situadas en la cercanía de centros urbanos, en los que gran cantidad de fresado es acopiado, tanto por su valor económico como por el ahorro inducido respecto a su vertido como material inerte.

Puesto que los cálculos no son a veces muy inmediatos, ha sido necesario el desarrollo de herramientas automatizadas que permiten evaluar económica y medioambientalmente cada una de las opciones.

Lo que no es adecuado en ningún caso es el aprovechamiento del fresado como material granular para vías de servicio, aparcamientos o bese de pavimentos. El empleo del fresado como material granular también puede catalogarse como reciclado pero bajo la etiqueta que en el mundo anglosajón denominan “downcycling”, que como su propio nombre indica significa una minusvaloración de dicho material.

Este tipo de usos menoscaba el valor intrínseco del fresado, por lo que el acopio y gestión de todo tipo de fresados debería ser una tarea programada mediante la colaboración entre las administraciones públicas (que son las generadoras del fresado) y las empresas constructoras.

Desde el punto de vista de operatividad industrial, qué duda cabe que el reciclado en baja tasa es claramente ventajoso, ya que además de aprovechar el betún del RAP con igual efectividad que en el reciclado en altas tasas, los problemas de sobrecalentamiento de áridos vírgenes se minimizan, además de permitir el uso de plantas de fabricación convencionales en las que hacen falta unos simples elementos de clasificación del fresado y alimentación.

No por ya haber sido mencionado merece la pena recordar la gran importancia de la clasificación del fresado en al menos dos fracciones. Las ventajas son dobles: mejor control del betún adicionado indirectamente a través del RAP y un óptimo control de la granulometría final de la mezcla.

¿Significa esto que el reciclado en alta tasa es desaconsejable desde un punto de vista de prestaciones? En absoluto, en los estudios realizados en las tareas 11 y 12 del Proyecto Fénix, se ha trabajado con porcentajes de RAP de hasta el 80% con unos resultados excelentes en términos de propiedades mecánicas de las mezclas finales, si bien es cierto que ha sido necesario desarrollar procedimientos específicos para obviar el muy alto calentamiento al que habría que someter los áridos vírgenes para una tasa del reciclado del 80% (de forma aproximada, habría que calentarlos por encima de 320ºC).

Existen experiencias industriales de reciclado in situ en caliente con aprovechamiento del 100% del material fresado que aun habiendo dado resultados aceptables obvian la optimización generada por una adecuada dosificación de cada una de las fracciones que componen el RAP.

Otro aspecto destacable del trabajo experimental del Proyecto Fénix, ha sido la evaluación de tramos reales realizados con porcentajes de RAP del 50 % hace unos 5 años, habiéndose comprobado que su comportamiento es similar al de las mezclas asfálticas convencionales.

6. IMPACTO AMBIENTAL DEL RECICLADO A DIVERSAS TASAS.

Anteriormente se ha citado el uso de herramientas automatizadas para evaluar y comparar las diversas opciones de aprovechamiento del RAP. En el caso concreto del impacto medioambiental, en el Proyecto Fénix se han utilizado dos herramientas concretas.

La primera de ellas es un software que utiliza efectúa el análisis del ciclo de vida por medio de la metodología del Ecoindicador 99. Esta metodología es ampliamente utilizada en muchos sectores industriales.

En la introducción de esta Monografía se habla más en detalle de la misma, y se recalca la importancia que tiene el reciclado como aporte a la sostenibilidad de los procesos constructivos y de mantenimiento de las carreteras.

Una segunda herramienta es la desarrollada en el seno de la Tarea 11 (reciclado en caliente) que ha centrado su campo de actuación en la huella de carbono.

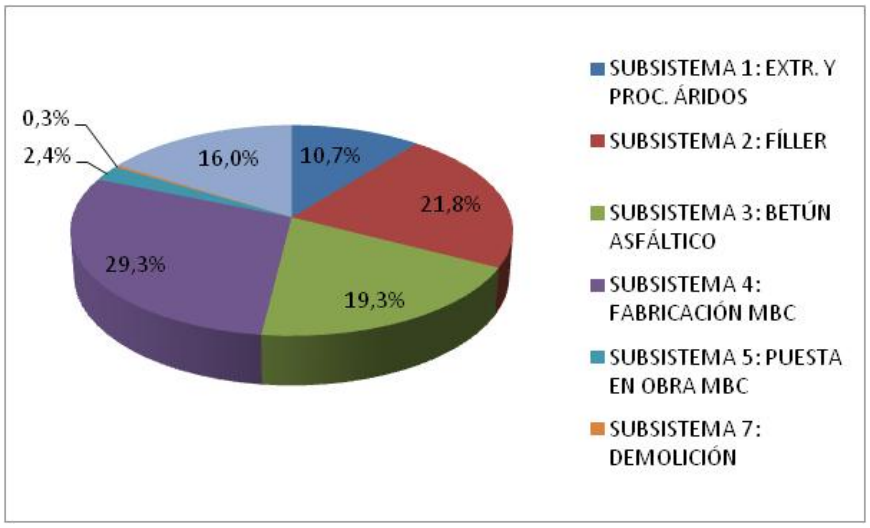


Figura 2. Huella de carbono de las mezclas bituminosas

Uno de los aspectos más interesantes del estudio es que la reducción de impactos ambientales medida por medio de la huella de carbono es relativamente superior en los reciclados en tasa baja-moderada (20%) que a altas tasas (50-70%). Tabla 2.

MEZCLAS UPM	F0 - 0% RAP		F20 - 20% RAP		F70 - 70% RAP	
SUBSISTEMAS	kg CO2 eq/t MBC	Porcentaje	kg CO2 eq/t MBC	Ahorro	kg CO2 eq/t MBC	Ahorro
SUBSISTEMA 1: EXTR. Y PROC. ÁRIDOS	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]
SUBSISTEMA 2: FÍLLER	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]
SUBSISTEMA 3: BETÚN ASFÁLTICO	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]
SUBSISTEMA 4: FABRICACIÓN MBC	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]
SUBSISTEMA 5: PUESTA EN OBRA M BC	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]
SUBSISTEMA 7: DEMOLICIÓN	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]
SUBSISTEMA 8: TRANSPORTE	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]
TOTAL:	61,87	100,0%	56,57	8,6%	49,57	19,9%

Tabla 2. Huella de carbono de reciclado en caliente a diversas tasas de RAP

Otra cuestión importante es cómo minimizar los problemas asociados al alto sobrecalentamiento que hay que aplicar a los áridos vírgenes cuando se emplean altos porcentajes de RAP, para conseguir una adecuada temperatura final de la mezcla.

Una de las posibilidades estudiadas es el uso de mezclas recicladas semicalientes. Con ellas, si bien es posible reducir la temperatura de fabricación, por lo que la temperatura de los áridos vírgenes no tiene que incrementarse tanto, al contabilizar los impactos ambientales asociados a los diversos tipos de aditivos que se necesitan para poder reducir la temperatura de fabricación, el balance global es que en el mejor de los casos se igualan los impactos de una mezcla reciclada convencional (Figura 3).

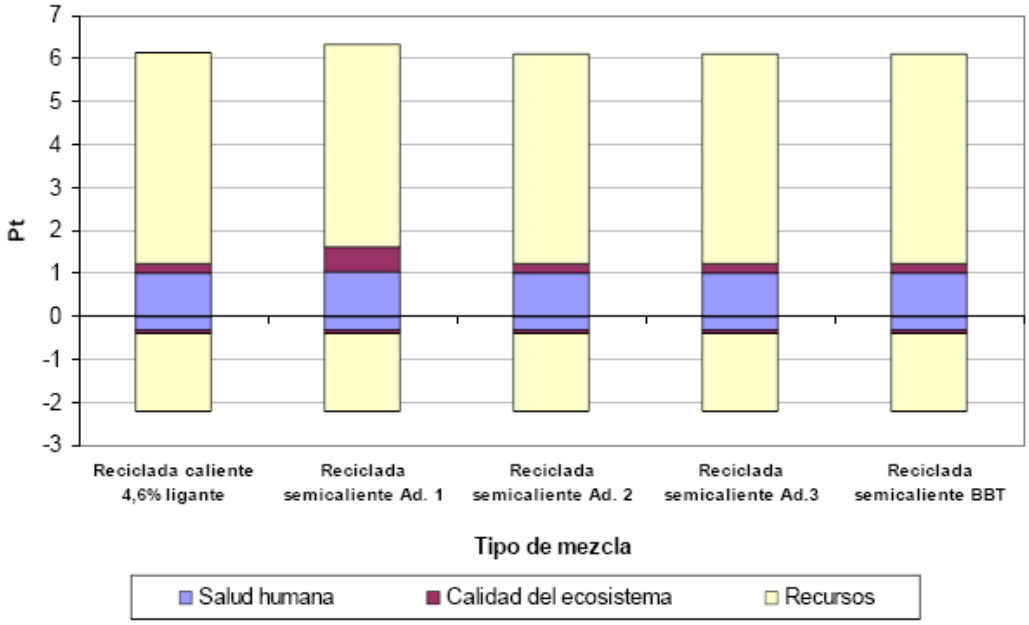


Figura 3. Ecoindicador 99 para una serie de mezclas recicladas.

Esto no descarta completamente el uso de este tipo de aditivos ya que, como se comentó anteriormente, existen casuísticas múltiples en las que la combinación de logística, disponibilidad de RAP, tipo de planta etc. pueden hacer interesante la aplicación de la tecnología de mezclas semicalientes.

Comentarios similares podrían hacerse en relación al uso de mezclas templadas.

Como resumen de este los dos anteriores apartados podemos afirmar que es posible fabricar mezclas recicladas con hasta un 80% de RAP (a escala de laboratorio) con propiedades mecánicas "estándar", aunque desde un punto de vista económico y medioambiental el reciclado en tasas del 10-20% es el más interesante.

También hay que resaltar que los seguimientos de obras con un 50% de RAP muestran un comportamiento óptimo.

En cualquier caso, el empleo de RAP en la fabricación de mezclas asfálticas supone una mejora substancial de la sostenibilidad de las mezclas bituminosas. Dicha mejorar se produce, principalmente, por el aprovechamiento íntegro del betún y de los áridos contenidos en el RAP, por lo que podemos hablar propiamente de RECICLADO, o mejor aún: REUTILIZACIÓN, que según los análisis de estrategias de mejora de la sostenibilidad de productos es la mejor opción tras el alargar la vida útil.

7. CONCLUSIONES

- Durante el proceso de reciclado en caliente, se produce un aprovechamiento íntegro del betún contenido en el RAP y de los áridos que lo componen.
- El reciclado en caliente es altamente ventajoso desde un punto de vista económico y medioambiental, en comparación con las mezclas asfálticas fabricadas con áridos vírgenes.
- Es imprescindible el tratamiento y clasificación del RAP en dos o más fracciones para optimizar las prestaciones de las mezclas asfálticas fabricadas con el mismo.
- El reciclado en baja tasa (10-20%) es más ventajoso que el reciclado en alta tasa, tanto por su menor impacto ambiental como por su mayor facilidad de fabricación. Sin embargo, el reciclado en alta tasa sigue siendo mucho más sostenible que el empleo de áridos vírgenes.
- La elección del ligante de aportación se debe hacer teniendo en cuenta fundamentalmente dos parámetros:
    - Porcentaje de RAP en la mezcla.
    - Funcionalidad de la capa de pavimento donde vaya a ser aplicada la mezcla asfáltica con RAP, incluyendo la solicitación tensional dependiente del espesor y tipología del firme.
- Las mezclas asfálticas con RAP suelen presentar un mejor comportamiento frente a la acción del agua que las mezclas convencionales, siendo similares en cuanto a rigidez y comportamiento a la fatiga.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Valdés, G., Martínez, A., Pérez Jiménez, F. (2008):" Estudio de la variabilidad del material asfáltico reciclable (RAP) y su influencia en las mezclas asfálticas recicladas fabricadas con altas tasas". IX Congreso internacional Provial. Puerto Varas (Chile), 3-7 de noviembre de 2008, pp. 85-102.

[2] McDaniel R, Huber G. and Gallivan V., 2006, Conserving resources and quality with high RAP content mixes, HMAT Hot Mix Asphalt Technology, VOL 11, NO: 6, pp 44-6

[3] Transportation Research Circular (TRC), 2002, Bailey Method for Gradation Selection in Hot Mix Asphalt Mixture Design, No E-C044, Transportation Research Board of the National Academies, Washington D.C.

[4] National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), 2001, Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave Mix Design

Method: Technician's Manual, Report 452, Transportation Research Board - National Research Council, National Academy Press, Washington D.C.

[5] Al-Qadi I.L., Carpenter S.H., Roberts G.F., Ozer H., Aurangzeb Q., Elseifi M. and Trepanier J., 2009, Determination of Usable Residual Asphalt Binder in RAP, Research Report ICT-09-031, Illinois Center for Transportation.

[6] McDaniel, R. S., H. Soleymani, R. M. Anderson, P. Turner, and R. Peterson, Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the SuperPave Mixture Design Method, NCHRP Final Report (9-12), TRB, Washington, D.C., 2000.

[7] Oliver, J. W. H., "The Influence of the Binder in RAP on Recycled Asphalt Properties," International Journal of Road Materials and Pavement Design, Vol. 2, No. 3, 2001, pp. 311- 325.

[8] Stephens, J. E., J. Mahoney, and C. Dippold, Determination of the PG Binder Grade to Use in a RAP Mix, Report No. JHR 00-278, Connecticut Department of Transportation, Rocky Hill, CT, 2001.

[9] Huang, B., G. Li, D. Vukosavljevic, X. Shu, X., and B. K. Egan, "Laboratory Investigation of Mixing Hot-Mix Asphalt with Reclaimed Asphalt Pavement," Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1929, Washington, D.C., 2005, pp. 37-45.

SOBRE LA PREDICCIÓN DEL COMPORTAMIENTO A LARGO PLAZO DE LOS FIRMES RECICLADOS IN SITU CON EMULSIÓN BITUMINOSA.

AUTORES

Miguel Ángel del Val Melús (Universidad Politécnica de Madrid), Antonio Páez Dueñas (Repsol).

1. INTRODUCCIÓN

En los aproximadamente veinte años en los que se llevan realizando reciclados de firme in situ con emulsión bituminosa los principales esfuerzos se han dirigido hacia los estudios de formulación y de caracterización en laboratorio y hacia los procesos de puesta en obra. Por otro lado, también se han llevado a cabo bastantes trabajos sobre el comportamiento a corto plazo de estos reciclados, es decir, durante la etapa que se suele denominar de maduración.

En cambio, se han hecho menores esfuerzos, y en consecuencia los avances han sido también menores, en aspectos tales como el diseño estructural de las rehabilitaciones basadas en el reciclado en frío con emulsión bituminosa, y la predicción y la evaluación del comportamiento a largo plazo de los firmes así rehabilitados. Esa es la razón por la que estos dos temas han sido especialmente abordados dentro de la tarea 8 del Proyecto Fénix.

En concreto, se ha pretendido arrojar luz sobre las relaciones causa / efecto entre las variables manejadas durante las etapas de diseño y de construcción y el comportamiento a largo plazo. La justificación de este objetivo es bastante clara: dadas las ventajas ambientales que comporta el reciclado en frío, si su comportamiento fuese más predecible las aplicaciones aumentarían, incluso en carreteras con tráficos pesados intensos.

2. ANTECEDENTES

Los estudios de formulación y de caracterización en laboratorio sobre los reciclados in situ con emulsión bituminosa se han acometido en gran medida hasta la fecha tomando como base los que, desde hace más de cuatro décadas, se han venido llevando a cabo sobre las mezclas densas con emulsión y sobre las mezclas denominadas grava emulsión. Tanto en España como en otros países (USA, México, Francia, etc.) se han abordado muchas investigaciones que, sin embargo, no han servido aún para superar definitivamente algunos problemas graves, fundamentalmente relacionados con las características intrínsecas de estos materiales: la presencia de agua y, como consecuencia, la no inmediatez en la consecución de la cohesión pretendida.

En cuanto a la puesta en obra, los avances se han plasmado en la existencia y utilización masiva de equipos específicos (recicladoras), que se han ido progresivamente mejorando de manera muy notable en aspectos tales como la potencia (para poder trabajar con buenos rendimientos en espesores relativamente importantes), la homogeneidad en la disgregación del firme antiguo (en la medida en que la composición de éste permita esa homogeneidad), la eficiencia del mezclado de los materiales nuevos y los viejos con rendimientos cada vez mayores, y la regularidad superficial del producto final. Sin embargo, han seguido persistiendo los problemas relacionados con la densificación de la mezcla reciclada, aunque hay que reseñar que en alguna medida esos problemas no son independientes de los que se plantean en laboratorio en materia de dosificación y de caracterización del material.

En relación con la valoración del comportamiento a corto plazo de los reciclados in situ con emulsión bituminosa existen algunas investigaciones especialmente relevantes. Aunque pueda resultar llamativa por su aparente simplicidad, la conclusión quizás más importante de esas investigaciones es la que señala que la mejor medida del avance del proceso de maduración (y por tanto de adquisición de las características establecidas previamente en el laboratorio) es la altura de los testigos (tomados con sonda rotatoria) que se pueden extraer del material reciclado sin desintegrarse: la maduración se puede dar por concluida cuando dicha altura es igual al espesor total reciclado. Se han llegado a establecer así correlaciones razonablemente satisfactorias entre las distintas variables involucradas: dosificación del material, espesor de la capa, densidad alcanzada en la puesta en obra, temperatura ambiente y humedad.

Sobre la valoración del comportamiento a largo plazo, un análisis de los conocimientos actuales permite concluir que los aspectos en los que hay que profundizar se pueden clasificar de la siguiente manera:

- En materia de predicción del comportamiento a largo plazo (tanto de la mezcla bituminosa resultante del reciclado como del conjunto del firme rehabilitado):
    - Correlación con los ensayos de dosificación y de caracterización inicial
    - Correlación con las variables involucradas en el proceso de puesta en obra
    - Correlación con las variables involucradas en el proceso de maduración y con el comportamiento a corto plazo.
- En materia de evaluación del comportamiento a largo plazo (esencialmente referida al conjunto del firme rehabilitado):
    - Identificación de los mecanismos de deterioro (agrietamientos, deformaciones, etc.)
    - Selección de los procedimientos de auscultación estructural

- Selección de los modelos de comportamiento o de evolución

3. CORRELACIÓN DEL COMPORTAMIENTO A LARGO PLAZO CON LOS ENSAYOS DE DOSIFICACIÓN Y DE CARACTERIZACIÓN INICIAL

Antes de entrar en el análisis detallado de los aspectos relacionados con la valoración del comportamiento a largo plazo de los reciclados in situ con emulsión debe tenerse en cuenta que se está ante un material esencialmente evolutivo desde un punto de vista mecánico, en el que pueden distinguirse las siguientes fases o etapas:

- Fase 1: Inicialmente el reciclado in situ con emulsión es un material que carece prácticamente de cohesión y cuyo rozamiento interno se ve negativamente afectado por la presencia de agua. Esta fase tiene lugar durante el propio proceso de puesta en obra y puede darse por concluida al finalizar la compactación.

- Fase 2: El crecimiento de la cohesión es aún poco significativo, pero la incidencia del agua en el rozamiento interno es ya despreciable, por lo que el comportamiento se puede asimilar al de un material granular. Es una etapa que, tras la ejecución del reciclado, puede durar desde algunas horas hasta algunos días.

- Fase 3: La cohesión es significativa, aunque no ha alcanzado el valor máximo esperado y además se cuenta, lógicamente, con la componente de resistencia debida al rozamiento interno. Es una etapa que puede durar desde unas pocas semanas hasta varios meses; junto con la anterior constituye el período denominado de maduración.

- Fase 4: Se ha alcanzado la cohesión máxima y el material es en teoría un hormigón bituminoso, pero con un comportamiento distinto no sólo por el valor más bajo del módulo de rigidez en unas determinadas condiciones de temperatura y de velocidad de aplicación de las cargas, sino por su distinta respuesta a estas dos variables y sobre todo en relación con el proceso de acumulación del daño. Se puede observar que el agotamiento no se presenta ni mucho menos tan pronto como se deduce de la aplicación de modelos de comportamiento como los que se emplean habitualmente en el caso de los hormigones bituminosos.

- Fase 5: En la fase final de su vida útil el reciclado en frío con emulsión bituminosa tiene un comportamiento que no es igual que el de un hormigón bituminoso en caliente convencional, por lo que el planteamiento de su rehabilitación no puede abordarse de la misma manera. El comportamiento no es muy diferente al de la fase 2.

Para el análisis mecánico de las distintas fases, y obviamente no de igual forma, se pueden aplicar uno o varios de los modelos de comportamiento reológico conocidos, los cuales, como es sabido, sirven para representar las posibles relaciones entre tensiones (σ), deformaciones (ε) y tiempo (t): bien los más simples (Hook, Newton

y Saint-Venant), o bien los que son algo más complejos (Kelvin-Voigt, Maxwell y Burgers). En todo caso, hay que tener en cuenta que cuando se habla del comportamiento a largo plazo de los reciclados in situ con emulsión bituminosa el problema no es sólo el de la predicción y evaluación del comportamiento del material reciclado, sino el de la predicción y evaluación del conjunto del firme rehabilitado mediante la técnica del reciclado in situ. Por tanto, influyen en dicho comportamiento a largo plazo factores tales como el tráfico pesado soportado en relación con el previsto en el proyecto de rehabilitación, la composición de la sección rehabilitada, la naturaleza de la explanada, el estado en el que se encontraba el firme en el momento de ser rehabilitado, etc.

Las dificultades para establecer la correlación del comportamiento a largo plazo con los ensayos de dosificación y de caracterización inicial tienen su raíz en la fabricación de las probetas en el laboratorio (principalmente en la definición del procedimiento de compactación) y en su curado, con el que se debería simular el proceso completo de maduración (incluyendo la posterior evolución de la respuesta del material según las condiciones de temperatura y de velocidad de aplicación de las cargas). Con los conocimientos actuales, y con la experiencia que hay al respecto, se puede asegurar que el procedimiento de compactación más aconsejable es el que proporciona la máquina giratoria (Norma UNE-EN 12697-31). Efectivamente, cualquier otro método ha mostrado su inadecuación en mayor o menor medida por la dificultad de densificar que provoca la presencia del agua y por la diferente ordenación interna de las partículas que se consigue con respecto a la lograda con los métodos de compactación disponibles en la obra (en los que se persigue combinar adecuadamente las pasadas dadas por los rodillos metálicos y los de neumáticos pesados, siendo esencial el efecto producido por estos últimos). En cuanto al curado de las probetas en laboratorio, se han establecido diversos procedimientos, todos ellos estudiados con exhaustividad, pero que no son el objeto del presente análisis.

En cuanto a los ensayos mecánicos de dosificación, se ha demostrado que lo más importante en relación con el comportamiento a largo plazo es garantizar de entrada en el laboratorio la mayor resistencia posible a la acción del agua. Aceptando que esta característica debe ser evaluada mediante una resistencia conservada, lo que no está suficientemente claro aún es el ensayo mecánico de referencia que se debe adoptar; es más, el ensayo de resistencia a tracción indirecta a 15 ºC resulta dudoso incluso para su empleo, aunque ya se haya incluido en las especificaciones, con hormigones bituminosos en caliente (Normas UNE-EN 12697-23 y UNE-EN 12697-12), debido entre otras razones a problemas con su repetitividad y con su reproducibilidad, así como con su sensibilidad frente a algunas variables de la dosificación, los cuales probablemente se agraven con materiales como los reciclados en frío con emulsión bituminosa. Mientras estos problemas no estén resueltos debería seguirse trabajando también con los ensayos tradicionales de compresión simple a 25 ºC.

4. CORRELACIÓN DEL COMPORTAMIENTO A LARGO PLAZO CON LAS VARIABLES INVOLUCRADAS EN EL PROCESO DE PUESTA EN OBRA

Como se puede deducir con facilidad de algunos de los párrafos anteriores, se deben considerar las siguientes variables involucradas en el proceso de puesta en obra:

- Homogeneidad de la disgregación conseguida en el material viejo que se somete al proceso de reciclado: su no consecución no se suele deber tanto a deficiencias en el proceso de disgregación como a la heterogeneidad del material que se recicla.

- Homogeneidad en el proceso de mezclado del material viejo disgregado con la emulsión bituminosa, con el agua que se pueda añadir aparte de la propia de la emulsión y con otras adiciones que se puedan incorporar: es esencial que la velocidad de avance de la recicladora sea moderada, aconsejándose que en ningún caso se sobrepase una velocidad de 10 m/min.

- Uniformidad del espesor de reciclado, cuyo valor mínimo debe ser el establecido en el proyecto de rehabilitación: las diferencias en el espesor suelen estar asociadas a velocidades de avance de la recicladora demasiado elevadas.

- Densificación uniforme y suficientemente elevada: como en cualquier mezcla bituminosa el comportamiento mecánico va a depender en gran medida de la densidad que se ha alcanzado con el proceso de compactación; aunque dada la naturaleza del material en sus primeras etapas de vida no es descartable la contribución a este proceso del paso de los vehículos pesados, no se debe contar con ella pues la densificación conseguida será muy diferente de unas zonas a otras y aparecerán deformaciones y otros deterioros asociados.

- Regularidad superficial: no sólo deben preocupar las posibles deficiencias en la medida en que se pueden incluir en los mecanismos de deterioro (deformaciones), sino que la irregularidad superficial influye en los efectos estructurales sobre el firme rehabilitado de las cargas dinámicas de los vehículos pesados.

El análisis detallado de todas estas variables, y de cómo influye realmente cada una de ellas en el comportamiento a largo plazo del reciclado in situ con emulsión bituminosa, se ha dejado sin embargo fuera de los trabajos abordados en el marco del Proyecto Fénix.

5. CORRELACIÓN DEL COMPORTAMIENTO A LARGO PLAZO CON LAS VARIABLES INVOLUCRADAS EN EL PROCESO DE MADURACIÓN Y CON EL COMPORTAMIENTO A CORTO PLAZO

Parece claro que uno de los factores que más puede influir en que los reciclados in situ con emulsión bituminosa tengan comportamientos diferentes a largo plazo, aun partiendo de condiciones muy similares, y sobre todo que esos comportamientos sean muy poco predecibles, es la propia existencia del proceso de maduración: cuanto antes se alcance un valor de la cohesión próximo al máximo teóricamente previsto, es decir, cuanto antes se cumpla en la mayor medida posible la tercera de las etapas de la vida del reciclado que se han descrito más arriba, mejor será el comportamiento que cabe esperar a largo plazo. Por tanto, influyen directa y positivamente en el buen comportamiento a largo plazo de los reciclados in situ con emulsión bituminosa:

- El bajo contenido inicial de agua: debe ser el mínimo compatible con las necesidades de la envuelta y de la compactación.
- La elevada energía de compactación, que exige no sólo equipos pesados y el suficiente número de pasadas, sino además que debajo del reciclado haya unas capas (incluyendo el cimiento) que proporcionen la suficiente reacción para evitar el “colchoneo”.
- Las altas temperaturas ambientales.
- La baja humedad ambiental.
- Un espesor limitado: el camino recorrido por el agua hasta su salida debe ser el más corto posible.
- Un tiempo dilatado hasta que se extiende la capa superior.
- Una acción continuada y no canalizada del tráfico pesado.

Por otro lado, como es obvio, el valor máximo de la cohesión no sólo debe alcanzarse lo antes posible, sino que, además, cuanto más elevado sea, mejor. Pero no sólo se trata de que la cohesión sea elevada, sino de que lo sea finalmente la resistencia en su conjunto: por tanto, el rozamiento interno debe ser también lo más alto posible; por ello (aunque esta consideración retrotrae el análisis a la correlación del comportamiento a largo plazo con los ensayos de dosificación y de caracterización inicial) habrá que haber procedido en su caso a las correcciones granulométricas oportunas (es decir, a la aportación al reciclado de árido virgen, si fuese necesario), a fin de conseguir efectivamente un alto rozamiento interno (esencial, por otro lado, para que la resistencia sea apreciable en las etapas iniciales en las que no se puede, o sólo parcialmente, contar con la cohesión).

De las variables indicadas hay que tener en cuenta que sus respectivas importancias relativas decrecen en la medida en que se cuente en más alto grado con alguna o algunas de las restantes: así, por ejemplo, las altas temperaturas ambientales son tanto menos importantes cuanto menor sea el contenido inicial de

agua. Esto, en concreto, conduce a valorar los beneficios que se derivarían, en el sentido que se le quiere dar a este análisis, del empleo de unas emulsiones bituminosas que permitiesen que el reciclado in situ se desarrollase dentro de los parámetros de las denominadas "mezclas templadas" (de las que se ha ocupado directamente la tarea 4 del Proyecto Fénix).

6. IDENTIFICACIÓN Y PREDICCIÓN DE LOS MECANISMOS DE DETERIORO

Los mecanismos de deterioro a largo plazo que se han identificado en reciclados in situ con emulsión se pueden agrupar de la siguiente forma:

- Deformaciones
    - Blandones
    - Hundimientos en las rodadas
    - Roderas
- Agrietamientos
    - Agrietamientos longitudinales (en el eje, en el centro de carril o en el borde)
    - Agrietamientos longitudinales en las rodadas
    - Agrietamientos transversales
    - Agrietamientos en mapa o en piel de cocodrilo

Los deterioros detectados con más frecuencia son los hundimientos y los agrietamientos longitudinales en las rodadas. Aparecen, según los casos, prematuramente (en torno al segundo año tras la puesta en servicio de la rehabilitación) o bien al cabo de un período que se suele situar entre los 6 y los 12 años. Parece claro que cuando los deterioros se manifiestan prematuramente ello se debe a deficiencias en el diseño o en el proceso de ejecución que no deberían haberse producido de haberse llevado a cabo un control de calidad correcto; se trata, por tanto, de intentar ligar preferentemente determinadas propiedades de las mezclas recicladas con la aparición de los deterioros una vez que han transcurrido entre 6 y 12 años de su puesta en servicio. Esas propiedades serían en principio la resistencia a la fatiga y la resistencia a las deformaciones plásticas. Aunque los procedimientos para determinar estas características podrían ser diversos, lo más práctico en principio sería emplear los mismos que han sido especificados para los hormigones bituminosos en caliente:

- Para la resistencia a las deformaciones plásticas, el ensayo de pista de laboratorio (Wheel Tracking), según UNE-EN 12697-22 (con dispositivo pequeño, procedimiento B en aire, temperatura de ensayo de 60ºC y una duración de 10000 ciclos).

- Para la resistencia a la fatiga, el ensayo de flexotracción dinámica en cuatro puntos, a una temperatura de 20 ºC y con una frecuencia de 30 Hz, según el anexo D de UNE-EN 12697-24.

Ambos ensayos se realizarían sobre un material curado en laboratorio hasta haber alcanzado las mismas características que se espera que en la obra tenga la mezcla reciclada tras el proceso de maduración. De acuerdo con lo especificado para los hormigones bituminosos en caliente, las probetas para estos ensayos deberían ser compactadas según el procedimiento descrito en la UNE-EN 12697-33, con el dispositivo de rodillo de acero. Sin embargo, se ha comprobado que sobre todo a la hora de cortar las probetas prismáticas para el ensayo de resistencia a la fatiga existe un elevadísimo riesgo de que el material se desmorone (aun estando correctamente curado), por lo que el procedimiento que se propugna como más viable es el de fabricar, sobre un soporte cuidadosamente nivelado de hormigón hidráulico, planchas de grandes dimensiones (por ejemplo, 2x2 m2), que se compactan con un mini compactador de los que a menudo se utilizan en las obras, y que luego se cortan con sierra para obtener las probetas con las dimensiones especificadas para cada uno de los ensayos.

Se ha demostrado que el resultado del ensayo de pista de laboratorio es suficientemente predictivo sobre el futuro comportamiento frente a las deformaciones permanentes, siempre que en la obra se haya alcanzado de manera uniforme una densificación suficientemente elevada. En cambio, el ensayo de flexotracción dinámica en cuatro puntos (como otros de los que se pueden adoptar con idéntico fin) no resulta finalmente adecuado para predecir la aparición de eventuales agrietamientos estructurales. La razón estriba en que, como ocurre con la grava emulsión, se deberían tener en cuenta los muy diferentes comportamientos en épocas cálidas y en épocas frías, con importantes fenómenos de autorreparación que se dan en aquéllas. Dicho de otro modo, no se puede esperar un carácter predictivo de ensayos diseñados para la evaluación del comportamiento de materiales elásticos (o que se pueden asimilar a tales) si se aplican a materiales que durante largos períodos tienen comportamientos no elásticos.

Distintos autores mantienen que la propiedad más importante de los materiales bituminosos reciclados in situ en frío es la resistencia al esfuerzo cortante: esta propiedad se debe evaluar mediante ensayos triaxiales en los que se obtenga la línea de fallo de Möhr-Coulomb del material, determinándose así el valor de la cohesión c (ordenada de la línea de fallo en el origen) y del ángulo de rozamiento interno Φ (pendiente de la recta).

En este sentido, tiene mucha importancia la denominada relación de esfuerzos (SR, Stress Ratio). La relación de esfuerzos (SR) se puede expresar de dos maneras diferentes. En la primera de ellas se define como el cociente entre la tensión principal mayor (σ_1) y la tensión principal mayor de fallo (σ_1,f):

$$SR = \frac{\sigma_1}{\sigma_{1,f}} = \frac{\sigma_1}{\sigma_3\left[\tan^2\left(45^o + \frac{\phi}{2}\right)\right] + 2c\tan\left(45^o + \frac{\phi}{2}\right)} \quad (1)$$

En la segunda forma SR se define como el cociente entre la tensión desviadora (σd) y la tensión desviadora de fallo (σ_d,f):

$$SR = \frac{\sigma_d}{\sigma_{d,f}} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{1,f} - \sigma_3} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_3\left[\tan^2\left(45^o + \frac{\phi}{2}\right) - 1\right] + 2c\tan\left(45^o + \frac{\phi}{2}\right)} \quad (2)$$

siendo σ_3 la tensión de confinamiento (tensión principal menor).

De las dos expresiones anteriores, diversos autores consideran que la expresión 2 (en función de la tensión desviadora) es la más idónea; su ventaja radica en que dicha tensión desviadora no está influida por los niveles de la presión de confinamiento, mientras que la tensión principal mayor sí lo está. No obstante, numerosos investigadores han utilizado la expresión 1 (en función de de la tensión principal), sobre todo en la investigación del comportamiento mecánico de materiales granulares.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Batista, F.A.: Novas técnicas de reabilitaçao de pavimentos, Dissertaçao de Doutoramento, Universidade do Porto, 2004.

Boyce, H.R.: A non-linear model for the elastic behavior of granular materials under repeated loading, Proceedings of the International Symposium on Soils under Cyclic and Transient Loading, 285-294, 1980.

Cundall, P.; STRACK, O.D.: A discrete numerical model for granular assemblies, Géotechnique 29(1), p. 47-65, 1979.

Del Val, M.A.; Rocci, S.: Guía para el dimensionamiento de firmes reciclados in situ en frío, 71 pág., Probisa, Madrid, 1998.

Ebels, L.J.: Characterization of material properties and behavior of cold bituminous mixtures for road pavements, Dissertation presented for the degree of Doctor of Philosophy (Engineering), Stellenbosch University, 440 pág., South Africa, 2008.

García, C.; Pérez, I.; Corraliza, S.: Experiencias técnicas del reciclado in situ con emulsión asfáltica de la capa de base de la carretera N-VI, X Jornadas de conservación de carreteras, Asociación Técnica de Carreteras, Cáceres, 2006.

Hicks, R. G.: Factors influencing the resilient properties of granular materials, PhD thesis, University of California, Berkeley, 1970.

Jenkins, K. J.: Mix design considerations for cold and half-warm bituminous mixes, with emphasis on foamed bitumen, Dissertation presented for the degree of Doctor of Philosophy (Engineering), Stellenbosch University, South Africa, 2000.

Jenkins, K. J.; Long, F. M.; Ebels, L.J.: Foamed bitumen mixes = shear performance?, International Journal of Pavement Engineering, Vol. 8, nº 2, 2007.

Kim, Y.; Lee, H.: Determination of dynamic modulus of cold in-place recycling mixtures with foamed asphalt using new simple performance testing equipment, Proceedings of Transportation Research Board 86th Annual Meeting, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2007.

Kim, Y.; Lee, H.; Heitzman, M.: Dynamic modulus and repeated load tests of cold in-place recycling mixtures using foamed asphalt, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 21, nº 6, 2009.

Liebenberg, J.J.E.; Visser, A.T.: Stabilization and structural design of marginal materials for use in low-volume roads, Transportation Research Record nº 1819, 2003.

Liebenberg, J.J.E.; Visser, A.T.: Towards a mechanistic structural design procedure for emulsion-treated base layers, Journal of the South African Institution of Civil Engineering, 46(3), pp. 2–8, paper 554, 2004.

Loizos, A.: Evaluation of foamed asphalt cold in-place pavement recycling using non-destructive techniques, Journal of Transportation Engineering, Vol. 132, nº 12. 2006.

Loizos, A: In-situ characterization of foamed bitumen treated layer mixes for heavy-duty pavements, International Journal of Pavement Engineering, Vol. 8, nº 2, 2007.

Manlouk, M. S.: Rheology of cold-recycled pavement materials using creep test, Journal of Testing and Evaluation, Vol. 12, nº 6, 1984.

May, R. W.: The challenges to innovation with the MEPDG. Case Study: Cold Recycled Mixtures, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 77, 2008.

Pappin, J. W.: Characteristics of granular material for pavement analysis. PhD thesis, University of Nottingham, 1979.

Pérez, I.; Navarro, G.; Romana, M.G.: Comportamiento resiliente en las capas de base de materiales granulares, V Congreso Nacional de Firmes, Asociación Española de la Carretera, León, 2000.

Pérez, I.; Navarro, G., Romana, M.G.: Modelos predictivos de la deformación permanente de las capas de base de materiales granulares sueltos empleados en los firmes flexibles, V Congreso Nacional de Firmes, Asociación Española de la Carretera, León, 2000.

Pérez, I.; Medina, L.; Romana, M.G.: Permanent deformation models for a granular material used in road pavements, Construction and Building Materials, Vol. 20, nº 9, 2006.

Pérez, I.; Gallego, J.: Rutting prediction of a granular material for base layers of low-traffic roads, Construction and Building Materials, Vol. 24, nº 3, 2010.

Pérez, I.; Medina, L.; Gallego, J.: Plastic deformation behavior of pavement granular materials under low traffic loading, Granular Matter, Vol. 12, nº 1, 2010.

Santagata, E.; Chiappinelli, G.; Riviera, P.P.; Baglieri, O.: Triaxial testing for the short term evaluation of cold-recycled bituminous, Road Materials and Pavement Design, Vol. 11, 2010.

Thomas, T. W.; May, R.W.: Mechanistic-empirical design guide. Modelling of asphalt emulsion full depth reclamation mixes, Proceedings of Transportation Research Board 86th Annual Meeting, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2007.

Thomas, T. W.; May, R.W.: Testing asphalt emulsion full depth reclamation mixes for pavement design, International Symposium on Asphalt Emulsion Technology (ISAET), Arlington, Virginia, 2008.

Van Niekerk, A. A.: Mechanical Behavior and Performance of Granular Bases and Sub-bases in Pavements, PhD Dissertation, Delft University of Technology, The Netherlands, 2002.

INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DE MEZCLA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL RECICLADO EN FRÍO CON EMULSIÓN (RFE).

AUTORES

Francisco Guisado Mateo (Sacyr), Jacinto Luis Garcia Santiago (Sacyr), Antonio Paez Dueñas (Repsol) y Mercedes Ayala Canales (Repsol).

1. INTRODUCCIÓN.

El Reciclado in situ en frío con emulsión, presenta la limitación de que es necesario que transcurra un período de curado más o menos extenso entre su ejecución y la extensión de las capas de mezclas de refuerzo y/o rodadura superiores. Este aspecto supone una seria limitación para su uso. Con la técnica habitual, el período de maduración necesario (mínimo 2 semanas en condiciones óptimas) y la baja capacidad mecánica a corto plazo, con bajos módulos iniciales, no permiten, ni hacen aconsejable, anticipar la colocación de la capa de mezcla bituminosa en caliente de refuerzo y rodadura, tanto por la previsible deformación del perfil final por la pos compactación de la capa de RFE, como por el gran consumo de la vida a fatiga de la capa de mezcla bituminosa en caliente (MBC) que se produciría en esos estadios iniciales con soporte tan flexible.

Para paliar estas limitaciones, se desarrolló el Reciclado en Frío con Emulsión de Altas Prestaciones Iniciales. Mediante la utilización de un Ligante Hidráulico para eliminar el agua de la emulsión y una aditivo acelerador de curado, se conseguía un aumento significativo de la cohesión inicial, de tal forma que se podían extender las capas superiores en caliente en tiempos no superiores a 96 h.

Como continuación de los estudios para el incremento de la cohesión de los Reciclados en Frío, se consideró la Temperatura. Una primera línea de estudio ha sido conocer la influencia de la temperatura de compactación en la compactibilidad y en las propiedades mecánicas de las mezclas recicladas en frío con emulsión (RFE).

Es sabido que las limitaciones debidas al período de curado y a los bajos valores mecánicos iniciales de las mezclas en frío, se superarían pasando al dominio de las mezclas templadas, con temperaturas de fabricación por debajo, aunque próximas a los 100ºC. Esta técnica, de momento, está confinada en instalaciones fijas o en equipos in situ muy complejos y alejados de los objetivos del reciclado in situ.

Sin embargo, estos estudios de compactibilidad/temperatura del RFE, da indicaciones sobre una nueva visión, potencialmente muy interesante, que sería un camino intermedio entre los reciclados en frío (mezcla a temperatura ambiente) y las mezclas templadas, que pudiera estar al alcance de la tecnología in situ, con

incrementos de temperatura en la mezcla alcanzables sin una excesiva complejidad del equipo ni un gran consumo energético.

Como observación, pone de manifiesto la evolución de las propiedades de las mezclas RFE con el tiempo, al mismo tiempo que la misma mezcla compactada a distinta temperatura presenta diferentes propiedades y que la adición de aditivos influye directamente en sus características.

Este estudio confirma de un modo objetivo y medible, algo ya sabido o intuido, en base a la experiencia con esas soluciones, que los RFE ejecutados con buena climatología dan gran resultado, pero también se explicita que no sólo se precisan unas buenas condiciones de curado, sino que además si la capa está a buena temperatura, las densidades y propiedades mecánicas asociadas, iniciales y finales, serán más altas.

2. OBJETIVO.

El objetivo de este trabajo es determinar la influencia de la temperatura de compactación de una mezcla reciclada, fabricada con material bituminoso fresado, agua de preenvuelta y emulsión, compactado a la temperatura considerada, dentro del rango de "frío". Las temperaturas de compactación seleccionadas han sido: 10, 20, 30 y 40 ºC.

3. PROCEDIMIENTO DE ESTUDIO DE LABORATORIO.

Como sistema de compactación se ha utilizado la compactadora giratoria (según UNE EN 12697 – 31). Para todas las probetas se han establecido las mismas condiciones de compactación: energía de compactación, ángulo de giro, velocidad de giro, dimensiones y cantidad de mezcla.

El procedimiento de fabricación de las probetas ha sido el siguiente:

- Con el fresado a la temperatura de compactación, mediante mezcladora mecánica, se realiza la mezcla de fresado, agua de pre envuelta y emulsión.

Foto 1. Amasada de RFE.

- Los elementos de compactación se mantienen en cámara climática junto con la mezcla realizada en el punto 1 el tiempo mínimo necesario para que alcancen la temperatura de compactación.

Foto 2 Foto 3

- A la temperatura establecida se inicia la compactación de la mezcla realizada.

Foto 4. **Foto 5**. **Foto 6.**

Como se ha indicado anteriormente, se ha empleado una compactadora giratoria de última generación, en base a la norma de ensayo UNE EN 12697-31, con posibilidad de cambio de ángulo de giro, velocidad de giro y presión de contacto, permitiendo observar en tiempo real la evolución de la energía de corte y parámetros volumétricos con el número de giros.

Foto 7. Adquisición datos en tiempo real

Foto 8. Control presión

Foto 9. Fabricación

Foto 10. Compactación giratoria

Una vez compactadas las probetas se mantienen en la cámara climática para realizar el curado a 20ºC (Foto 11).

Foto 11. Curado de probetas en cámara climática.

4. ENSAYOS MECÁNICOS UTILIZADOS.

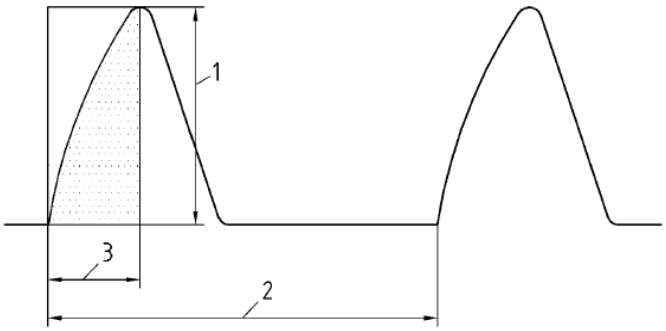
Para determinar la evolución de las propiedades de la mezcla con el tiempo y la temperatura de compactación, se han realizado los ensayos sobre las probetas fabricadas a los siguientes tiempos de curado: 24, 48, 72, 96 y 168 horas.

Los ensayos realizados sobre las mismas han sido:

1. **Modulo de Rigidez a Tracción Indirecta**, según la norma UNE EN 12697-26, Anexo C. Al tratarse de un ensayo no destructivo, se ensayaron cuatro probetas para cada tiempo de curado.

Foto 12. Modulo Rigidez a Tracción Indirecta

El procedimiento de ensayo consiste en aplicar un pulso de carga de forma sinusoidal, seguida de un periodo de reposos y registrar la deformación horizontal que sufre la probeta (Figura 1).



Leyenda

1 Carga máxima
2 Periodo de repetición de los impulsos
3 Tiempo de subida

Figura 1: Forma del impulso de carga, mostrando el tiempo de subida y la carga máxima.

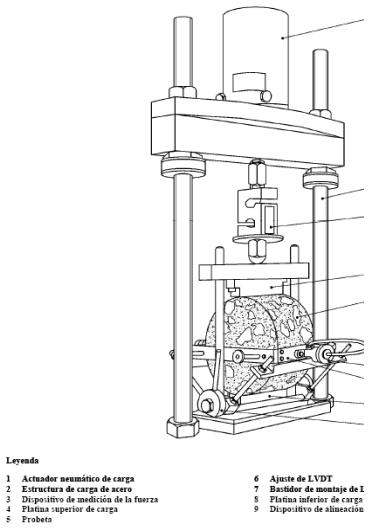


Figura 2: Montaje experimental del ensayo de Modulo de Rigidez a Tracción Indirecta.

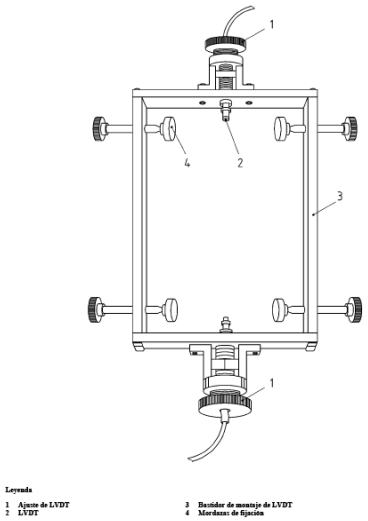
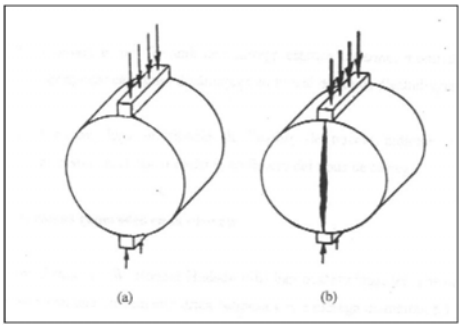


Figura 3: Dispositivo de medición de la deformación diametral horizontal.

Sobre cada probeta se aplican un total de 10 pulsos de carga, 5 a lo largo de un diámetro y otros 5 más después de hacer rotar la probeta 90º grados.

2. **Resistencia a Tracción Indirecta**, mediante compresión diametral hasta su rotura, como establece la norma de ensayo UNE-EN-12697-23, a una temperatura de ensayo de 15 ºC. Al ser este ensayo destructivo, se prepararon cuatro series de cuatro probetas para cada punto de curado y temperatura. En este ensayo se determina la cohesión alcanzada por la mezcla con la evolución del tiempo de curado y temperatura de compactación.

Consiste en aplicar una carga de comprensión diametral a lo largo de dos generatrices opuestas (Figura 4 y Foto 13) a una probeta cilíndrica. Esta configuración de carga provoca un esfuerzo de tracción relativamente uniforme en todo el diámetro del plano de carga vertical y agota la probeta, desencadenando la rotura en el plano vertical (Foto 14).

 **Figura 4**: Configuración de carga (a) y rotura del ensayo de Tracción Indirecta (b)	**Foto 13**. Ensayo a T. Indirecta.	**Foto 14**. Probeta 150 mm. rota a T. Indirecta.

El parámetro obtenido es la carga de rotura (Figura 5), pudiéndose determinar también el desplazamiento vertical y la deformación horizontal del diámetro de la probeta durante la realización del ensayo si se dispone de los sistemas necesarios.

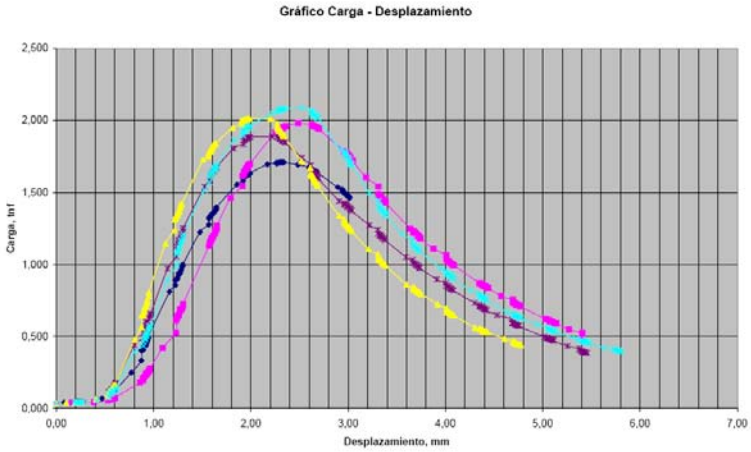


Figura 5: Carga – Desplazamiento resultante del ensayo de Tracción Indirecta

3. Con las probetas rotas a tracción indirecta, se procedió a medir la humedad de las mismas a cada tiempo de curado, mediante secado en estufa (NLT – 102). Estos datos indican la pérdida de agua a lo largo del tiempo y constituyen una medida indirecta del curado de las mismas.

5. MEZCLA DE RECICLADO EN FRÍO FABRICADA, COMPACTADA Y ESTUDIADA.

La mezcla de RFE estudiada, estaba basada en el reciclado en frío que se realizó en uno de los enlaces de la autopista de peaje AP66 León – Campomanes (Villablino), en Junio del 2007. El fresado que se utilizó para realizar el estudio se obtuvo empleando la misma fresadora de la obra (Wirtgen 2100 DCR del Parque de

Maquinaría de Sacyr) a la misma velocidad, ancho y espesor de ejecución del mismo.

Foto 15: RFE. API en Enlace Villablino.

La emulsión empleada fue una ECL2b Rejuvenecedora con un Residuo de Penetración 200 – 250 dmm. La dosificación empleada se recoge en la Tabla 1.

Tipo	RFE API
Fresado	100 %
Emulsión ECL-2b REJUVENECEDORA	4 %
Agua preenvuelta	2 %
Cemento	1,5 %
Aditivo	< 0,1 %

Tabla 1: Dosificación RFE. API.

Los resultados obtenidos en el Ensayo de Inmersión-Compresión (NLT – 162) se recogen en la Tabla 2. Como puede observarse, tanto los datos de resistencias en seco y en húmedo como los de resistencia conservada son suficientemente altos lo que indica buena adhesividad frente a la acción del agua.

Procedimiento	Nº 1, Inmersión en agua 24 h a 60ºC
Densidad probetas (g/cm³)	2,323
Resistencia en seco, MPa	4,79
Resistencia en húmedo, MPa	4,21
Resistencia conservada, %	88

Tabla 2: Resultados Inmersión – Compresión

6. RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS APLICADOS.

6.1 DENSIDADES VOLUMÉTRICAS VS. TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN.

En la Tabla 3 y la Figura 6 se recogen los resultados de densidades volumétricas obtenidos a las 24 horas en función de la Temperatura de Compactación. Como puede observarse, la densidad aumenta con la temperatura de compactación, lo que puede interpretarse como que la eliminación del agua que impide la compactación de las mezclas en frío aumenta a medida que aumenta la temperatura. Sin embargo dicha eliminación no es suficiente para que la mezcla no tenga suficientes fluidos de compactación, ya que en este caso se observaría un máximo de densidad.

RFE API	Densidad Volumétrica (Kg/m³)			
Temperatura	10 ºC	20 ºC	30 ºC	40 ºC
Promedio	2247	2257	2309	2325

Tabla 3: Resultados Densidad volumétrica de las probetas fabricadas a distinta temperatura de compactación.

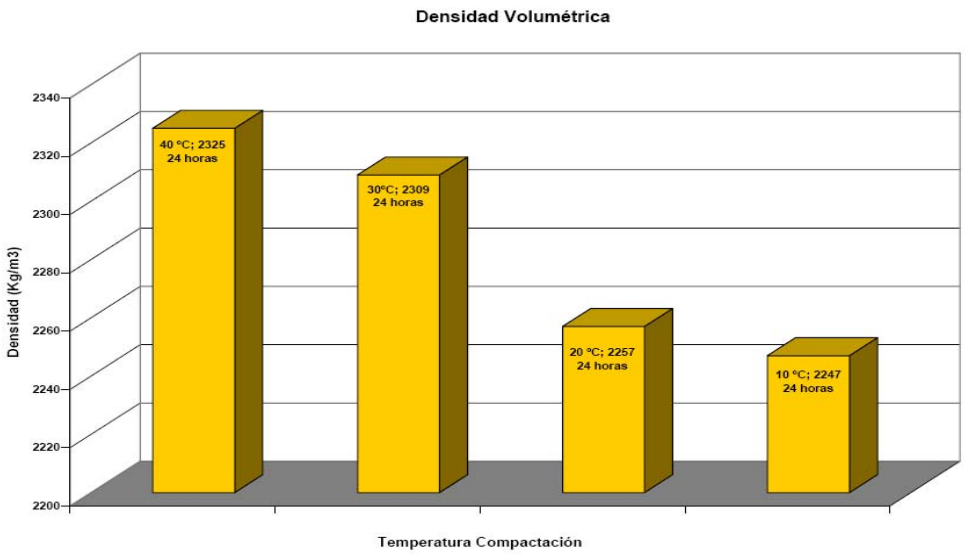


Figura 6. Densidades RFE. API a las Temperaturas de compactación establecidas.

En la figura 6 puede observarse un crecimiento exponencial hasta los 30ºC, mientras que a los 40ºC parece que el crecimiento exponencial disminuye formándose una S. Probablemente los 40ºC se acerquen al umbral mínimo deseable de la Temperatura de Compactación en Frío.

6.2 MODULO DE RIGIDEZ A TRACCIÓN INDIRECTA (UNE EN 12697 – 26, ANEXO C) FRENTE A LA TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN.

La temperatura de ensayo fue de 20 ºC, y las condiciones de ensayo las establecidas en la norma de ensayo mencionada. Los resultados obtenidos se recogen en la Tabla 4 y se representan en la Figura 7.

MODULO RIGIDEZ A DIFERENTES TEMPERATURAS DE COMPACTACIÓN SEGÚN UNE EN 12697- 26 (Anexo C)				
Temperatura	10 ºC	20 ºC	30 ºC	40 ºC
24 horas	901	1185	1260	1253
48 horas	1131	1509	1508	1575
72 horas	1256	1659	1657	1726
96 horas	1431	1687	1818	1908
168 horas	1592	1642	1916	2297

Tabla 4: Resultados de Modulo Rigidez a Tracción Indirecta de las probetas de RFE. API fabricadas a distinta temperatura de compactación

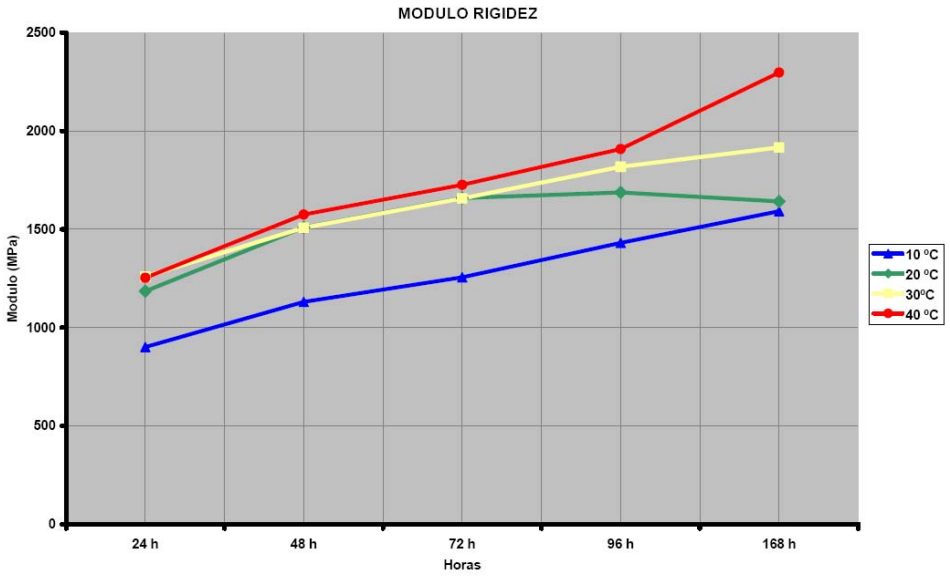


Figura 7.- Modulo Rigidez del RFE. API a distinta temperatura de compactación vs. Tiempo de curado.

Como puede observarse, el Módulo de Rigidez aumenta con el tiempo de curado. Parece que existen dos tendencias de aumento del Módulo. En una de ellas, las gráficas de 20, 30 y 40ºC, parecen confundirse y se encuentran muy alejados del de 10ºC. Este comportamiento se podría interpretar

diciendo que la Temperatura mínima de compactación en el Reciclado en Frío debe ser de 20ºC ya que a partir de esa Temperatura las propiedades mecánicas alcanzan su máximo valor y son relativamente independientes de la Temperatura de Compactación.

6.3 RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA A DIFERENTE TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN SEGÚN SU EVOLUCIÓN DE CURADO EN EL TIEMPO.

Los resultados anteriores parecen confirmarse si se estudia la Resistencia a Tracción Indirecta. Para realizar el ensayo se ha utilizado la norma europea UNE-EN 12697-23 Determinación de la resistencia a la tracción indirecta de probetas bituminosas a 15ºC. Los resultados obtenidos se indican en la Tabla 5 y se representan en la Figura 8.

RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA (MPa) A DIFERENTE TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN SEGÚN UNE EN 12697- 23				
Temperatura	10 ºC	20 ºC	30 ºC	40 ºC
24 horas	0,25	0,34	0,38	0,36
48 horas	0,30	0,44	0,39	0,43
72 horas	0,34	0,44	0,43	0,43
96 horas	0,35	0,47	0,54	0,53
168 horas	0,43	0,49	0,56	0,55

Tabla 5.- Resultados Resistencia a Tracción Indirecta de las probetas de RFE. API compactadas a distinta temperatura.

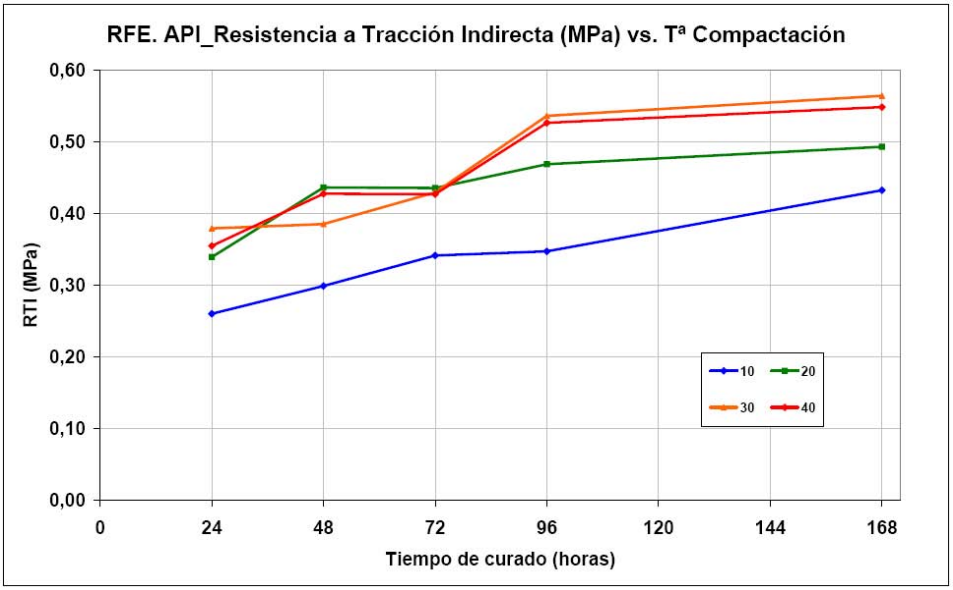


Figura 8.- Resistencia a Tracción Indirecta del RFE. API a distinta temperatura de compactación.

Existe una diferencia muy significativa entre las mezclas compactadas a 10ºC y las compactadas entre 20ºC y 40ºC, que en algunos tiempos llegan a confundirse.

6.4 HUMEDAD DEL RFE. API SEGÚN EVOLUCIÓN EN EL TIEMPO DE CURADO.

Las probetas rotas a tracción Indirecta se han utilizado para determinar su humedad, mediante secado en estufa según NLT-102.

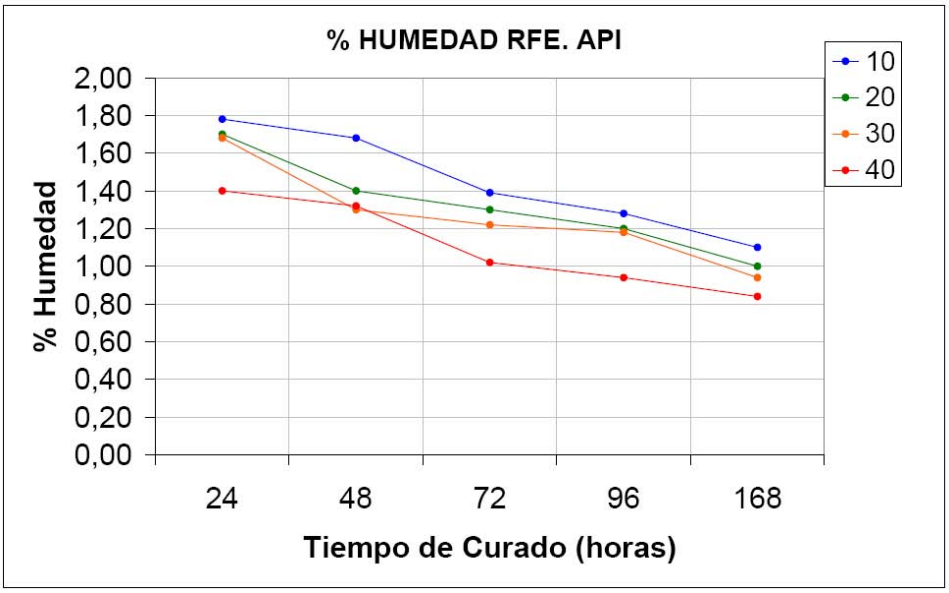


Figura 9.- % Humedad RFE. API vs. Tiempo de curado (horas)

Del mismo modo, que en el caso de las propiedades mecánicas, parece que existen dos grupos de curvas, lo que confirma la conclusión de que la Temperatura mínima de Compactación del Reciclado en Frío es de 20ºC.

6.5 VALIDACIÓN EN OBRA DE LOS RESULTADOS ANTERIORES.

Se validaron in situ los resultados obtenidos en Laboratorio en la rehabilitación de 14 Kilómetros de carril lento en la Autopista de Aucalsa, desde finales de Mayo a mediados de Julio 2009, en la que se fijó una temperatura mínima de mezcla de 25 ºC absoluta, y un umbral mínimo deseable de 40 ºC. La formula de trabajo volvió a basarse en el Reciclado en Frío con Emulsión de Altas Prestaciones Iniciales.

En esta obra se realizo un control termográfico sobre la evolución de la temperatura del reciclado con respecto al pavimento, desde la hora inicial matinal en función del tiempo de insolación. Con ello, se ha llegado a establecer un nuevo parámetro en la ejecución de los reciclados con altas prestaciones a edad temprana, que es la temperatura de puesta en obra de la mezcla en el momento de la compactación y la relación entre ese parámetro y las prestaciones iniciales y finales de producto, teniendo en cuenta siempre la necesidad de asegurar un avance de reciclado lento para asegurar una correcta curva granulométrica.

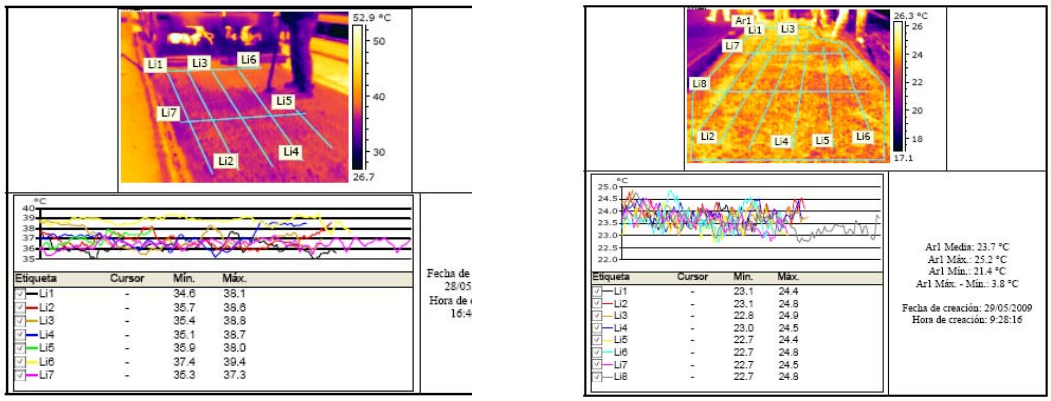


Foto 16. Ejemplos de termografías tomadas durante la ejecución del RFE. API, a primera hora de la mañana y durante la tarde.

Así, en estas formulaciones se han fijado unos umbrales mínimos de esa temperatura, por encima de los cuales las prestaciones buscadas en el RFE estarían aseguradas mientras que con temperaturas inferiores no se debería proceder a reciclar salvo que el equipo sea capaz de elevar esa temperatura hasta el umbral mínimo aceptable, es decir, 20ºC.

7. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL RFE. API FRENTE A OTRAS VARIANTES DE RECICLADO EN FRÍO CON EMULSIÓN.

Con el fin de comparar estos resultados de Reciclado en Frío con Emulsión de Altas Prestaciones Iniciales, a partir del mismo fresado, se fabricaron otras dos series de probetas con las mismas condiciones de ejecución y temperatura de compactación. Una mezcla corresponde a un Reciclado en Frío Convencional de emulsión más agua y el otro a un Reciclado en Frío Mejorado con cemento y agua.

La dosificación de los componentes de emulsión, agua y cemento, en función de la mezcla fabricada, fue la misma que para RFE. API, pero sin el aditivo en ninguna de las dos series.

Componentes	RFE. API	RFE MEJORADO	RFE CONVENCIONAL
Fresado	100 %	100 %	100 %
Emulsión	4 %	4 %	4 %
Agua	2 %	2 %	2 %
Cemento	1,5 %	1,5 %	--
Aditivo	< 0,1 %	--	--

Tabla 6. Dosificación de los RFE.

Se realizaron los mismos ensayos que los expuestos anteriormente: densidad, modulo rigidez, resistencia a tracción indirecta y humedad.

7.1 DENSIDAD VOLUMÉTRICA EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN DE LAS TRES MEZCLAS.

A continuación (Figura 10) se muestran los resultados, de manera comparativa, de la densidad obtenida después de compactación, utilizando las mismas condiciones de ensayo, de las tres mezclas.

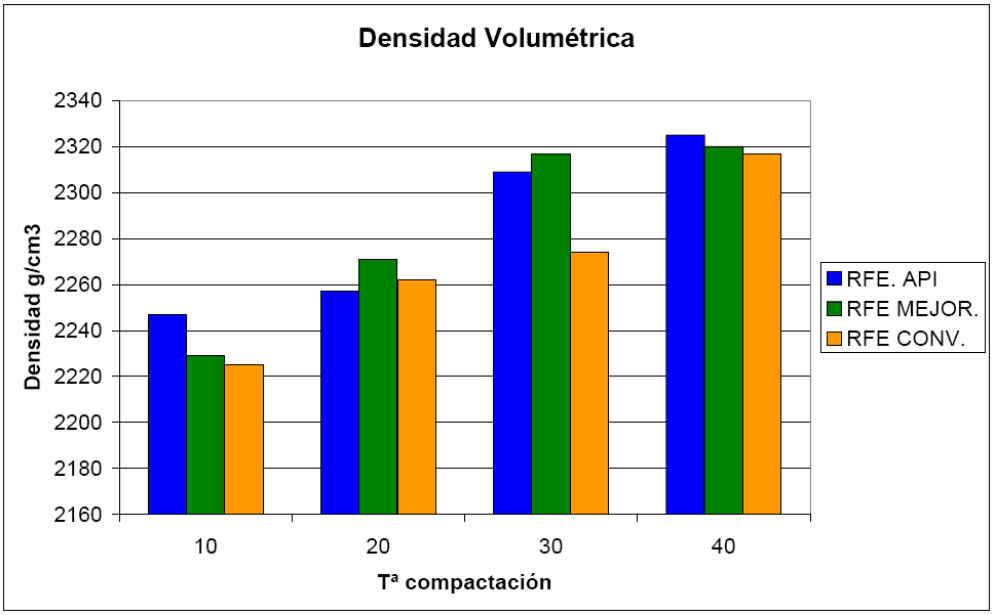


Figura 10. Comparativa de densidades obtenidas de los tres tipos de RFE.

Como puede observarse, a medida que aumenta la Temperatura, aumenta la densidad. Como se indicó anteriormente, hasta 30ºC el aumento es exponencial mientras que a 40ºC la subida parece decelerarse siendo el resultado una curva en forma de S. En todos los casos tanto el Reciclado en Frío de Altas Prestaciones Iniciales como el Reciclado en Frío Mejorado presentan mayor densidad que el Reciclado en Frío Convencional lo que muestra la eficacia del cemento para eliminar agua del sistema.

7.2 MODULO DE RIGIDEZ A TRACCIÓN INDIRECTA EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN:

A continuación se muestran (Tabla 7 y Tabla 8 y Figuras 11 y 12) los resultados promedios de las series de probetas fabricadas a las temperaturas establecidas y ensayadas a su tiempo de curado.

Modulo Rigidez Tracción Indirecta RFE MEJORADO (MPa)					
Tª Compactación	24 horas	48 horas	72 horas	96 horas	168 horas
10 ºC	761	903	996	1131	1200
20 ºC	879	1194	1383	1481	1552
30 ºC	1022	1313	1435	1551	1750
40 ºC	1114	1408	1578	1829	1837

Tabla 7. Valores promedio de Modulo a cada temperatura de compactación del RFE Mejorado.

Modulo Rigidez Tracción Indirecta RFE CONVENCIONAL (MPa)					
Tª Compactación	24 horas	48 horas	72 horas	96 horas	168 horas
10 ºC	494	782	842	995	1158
20 ºC	684	945	1051	1136	1369
30 ºC	873	1168	1244	1273	1589
40 ºC	986	1192	1295	1398	1705

Tabla 8. Valores promedio de Modulo del RFE Convencional.

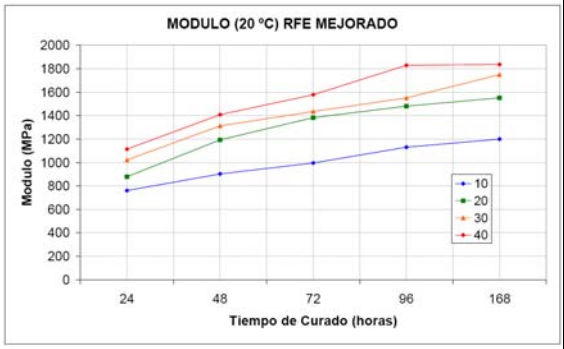


Figura 10.Módulo RFE Mejorado

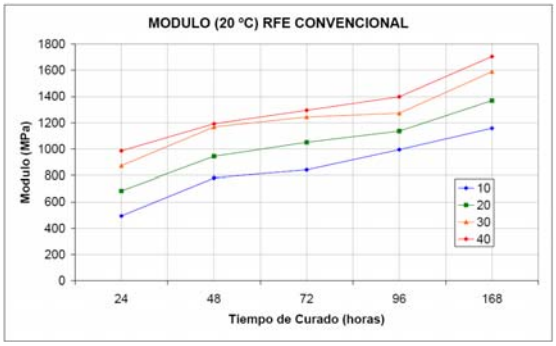


Figura 11. Módulo del RFE Convencional

En ambos tipos de reciclados se vuelve a observar la misma tendencia que con el Reciclado en Frío con Emulsión de Altas Prestaciones Iniciales, los valores de Módulo aumentan con la temperatura de compactación y hay una diferencia significativa entre los 10ºC y las demás Temperaturas.

De manera numérica, en la siguiente tabla se pueden ver los incrementos de Módulo que se obtienen utilizando la tecnología del reciclado en frío in situ de altas prestaciones iniciales, frente a las otras dos técnicas empleadas actualmente en España.

Incrementos del Modulo del RFE. API respecto a los otros dos tipos de reciclados:										
Curado	24 horas		48 horas		72 horas		96 horas		168 horas	
Temperatura	RFE Mejorado	RFE Convencional	RFE Mejorado	RFE Convencional	RFE Mejorado	RFE Convencional	RFE Mejorado	RFE Convencional	RFE Mejorado	RFE Convencional
10 ºC	15,6	45,2	20,2	30,9	20,7	33,0	21,0	30,5	29,1	31,6
20 ºC	25,9	42,3	21,4	37,8	16,7	36,6	12,2	32,7	8,3	19,1
30 ºC	18,9	30,7	12,9	22,5	13,4	24,9	14,7	30,0	8,7	17,1
40 ºC	11,1	21,3	10,6	24,3	8,6	25,0	4,1	26,7	14,5	20,6

Tabla 11. Incrementos de modulo del RFE. API frente al RFE Mejorado y Convencional.

Las siguientes gráficas muestran la comparativa respecto a modulo de rigidez a las distintas temperaturas de compactación establecidas. En todas ellas, el RFE. API muestra mejores valores a cualquier temperatura de compactación, siendo muy superiores al RFE Convencional y superiores al RFE Mejorado con la misma cantidad de emulsión, agua y sobre todo cemento, lo que nos indica la capacidad del aditivo de acelerar las propiedades de curado, medido en términos de Módulo de Rigidez.

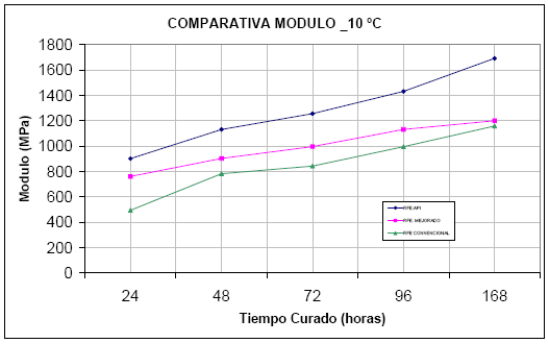


Figura 12.- Comparación de Modulo a 10 ºC.

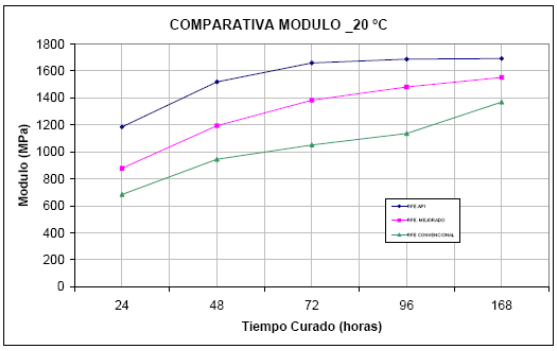


Figura 13.- Comparación de Modulo a 20 ºC.

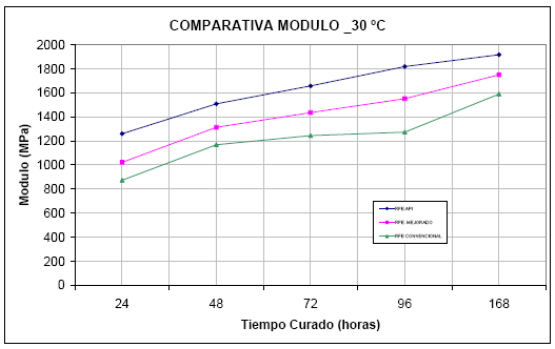


Figura 14.- Comparación de Modulo a 30 ºC

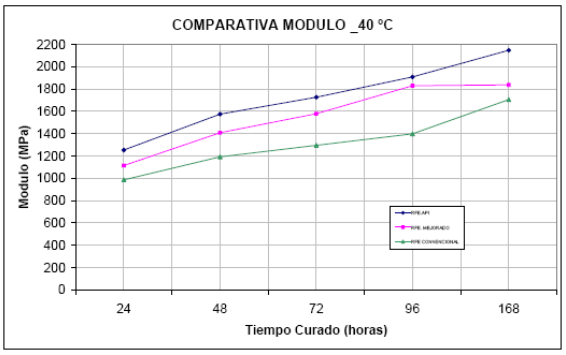


Figura 15.-Comparación de Modulo a 40 ºC.

-- RFE. API --RFE Mejorado -- RFE Convencional

7.3. RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN Y TIPO DE RECICLADO.

Las Tablas 12 y 13 muestran los valores promedio de Resistencia a Tracción Indirecta.

Resistencia Tracción Indirecta RFE MEJORADO (MPa)					
Tª Compactación	24 horas	48 horas	72 horas	96 horas	168 horas
10 ºC	0,25	0,27	0,28	0,34	0,41
20 ºC	0,33	0,33	0,38	0,40	0,43
30 ºC	0,31	0,32	0,39	0,40	0,47
40 ºC	0,34	0,36	0,44	0,47	0,56

Tabla 12. RTI del RFE Mejorado vs. Tª Compactación y Tiempo de curado.

Resistencia Tracción Indirecta RFE CONVENCIONAL (MPa)					
Tª Compactación	24 horas	48 horas	72 horas	96 horas	168 horas
10 ºC	0,12	0,16	0,23	0,24	0,28
20 ºC	0,16	0,23	0,27	0,27	0,35
30 ºC	0,17	0,24	0,30	0,31	0,36
40 ºC	0,19	0,25	0,31	0,35	0,37

Tabla 13. RTI del RFE Convencional vs. Tª Compactación y Tiempo de curado.

Los valores anteriores se representan en las figuras 16 y 17.

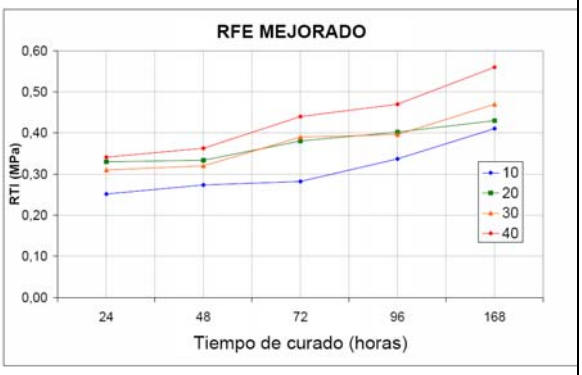


Figura 16. RTI del RFE Mejorado.

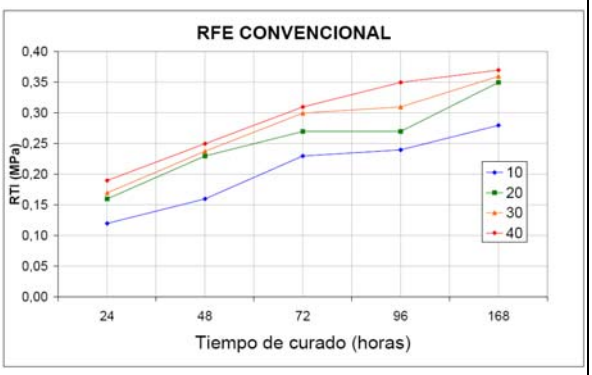


Figura 17. RTI del RFE Convencional

En la siguiente tabla (14) se pueden ver los incrementos de Resistencia a Tracción Indirecta que se obtienen utilizando la tecnología del reciclado en frío in situ de Altas Prestaciones Iniciales, frente a las otras dos técnicas.

Incrementos de RTI del RFE. API sobre los valores obtenidos en los otros dos tipos de reciclados:										
Horas curado	24 horas		48 horas		72 horas		96 horas		168 horas	
Temperatura	RFE Mejorado	RFE Convencional	RFE Mejorado	RFE Convencional	RFE Mejorado	RFE Convencional	RFE Mejorado	RFE Convencional	RFE Mejorado	RFE Convencional
10 ºC	3,2	53,8	8,9	46,7	17,0	32,4	3,7	31,4	4,5	34,9
20 ºC	2,9	52,9	25,0	47,7	13,5	38,6	14,4	42,6	12,2	28,6
30 ºC	18,4	55,3	17,9	39,1	9,3	30,2	26,7	42,6	16,1	35,7
40 ºC	2,5	45,7	15,6	41,9	0,0	29,5	11,3	34,0	-1,8	32,7

Tabla 14: Incrementos de RTI del RFE. API vs. Otros tipos RFE.

Las siguientes gráficas (Figuras 18 a 21) muestran una comparación de la Resistencia a Tracción Indirecta a las distintas temperaturas de compactación

establecidas. En todas ellas, el RFE. API muestra mejores valores a cualquier temperatura de compactación.

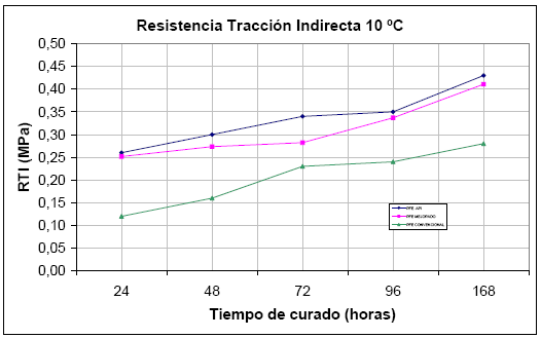


Figura 18. Comparación de RTI a 10 ºC

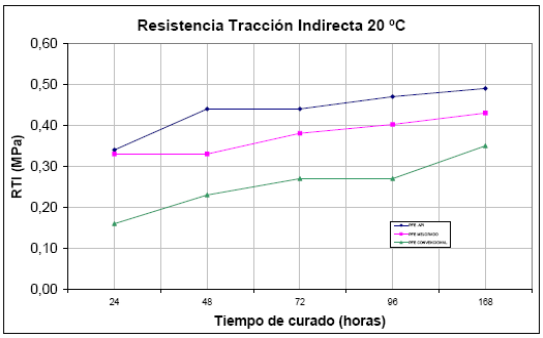


Figura 19. Comparación de RTI a 20 ºC

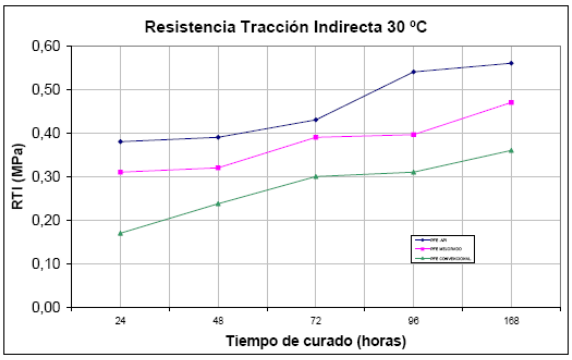


Figura 20. Comparación de RTI a 30 ºC

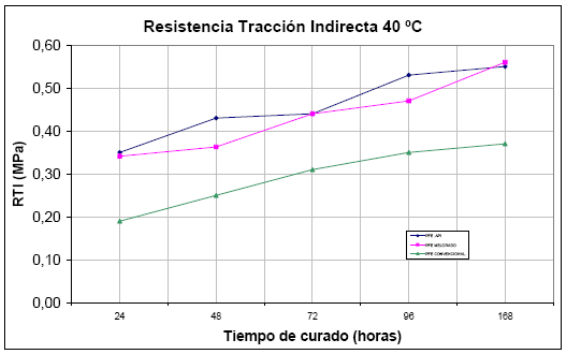


Figura 21. Comparación de RTI a 40 ºC

-- RFE. API --RFE Mejorado -- RFE Convencional

7.4 HUMEDAD EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN.

Las probetas rotas a tracción Indirecta se han utilizado para determinar la variación de la humedad en función del tiempo, mediante secado en estufa según NLT-102. Comparación de humedades entre los tres sistemas de Reciclado en Frío.

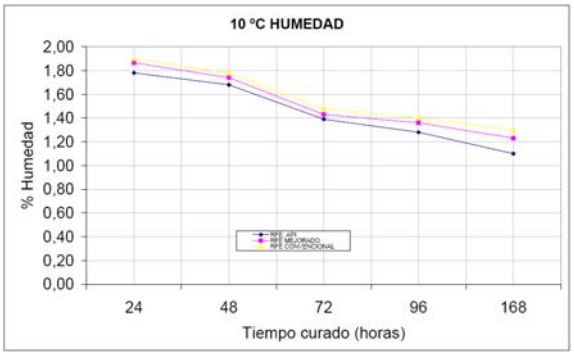


Figura 22. Comparación Humedad de los RFE a 10ºC.

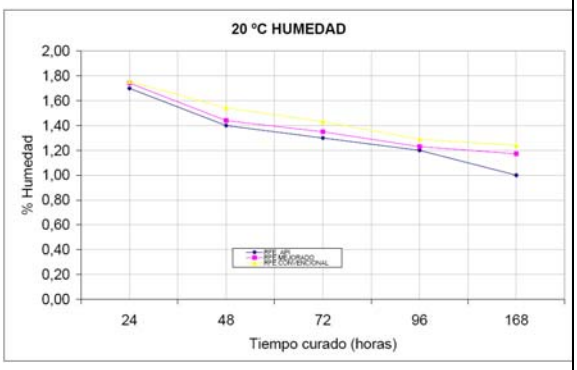


Figura 23. Comparación Humedad de los RFE a 20ºC.

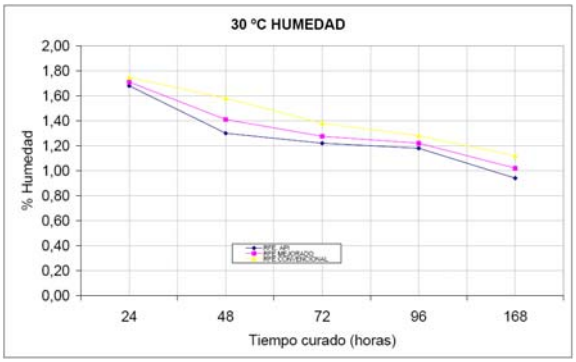


Figura 24. Comparación Humedad de los RFE a 30ºC.

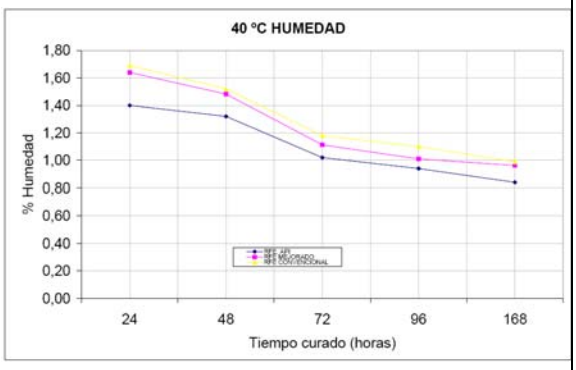


Figura 25. Comparación Humedad de los RFE a 40 ºC

-- RFE. API --RFE Mejorado -- RFE Convencional

En todos los casos el Reciclado en Frío con Emulsión de Altas Prestaciones Iniciales presenta una menos densidad.

8. INFLUENCIA DE OTRAS TEMPERATURAS Y REGULARIDAD GRANULOMÉTRICA EN LOS RECICLADOS EN FRÍO CON EMULSIÓN. PERSPECTIVA DE FUTURO.

Se trata de los primeros estadios del desarrollo de una nueva tecnología de ejecución in situ, cuyas bases de diseño se han estudiado en la subtarea 8.5 del Proyecto Fénix, Equipos para Reciclado en Frío. En dicha tarea se contemplan dos avances reseñables: por un lado el control de la composición granulometría de mezcla y por otro un aporte de calor para garantizar un rango mínimo de temperatura en la mezcla.

En este apartado se recogen los resultados obtenidos en el estudio de la influencia de la temperatura de compactación a temperaturas cercanas al rango de

“templado” y dosificación del fresado en fracciones controladas, a partir de otro fresado diferente al anterior recogido para este fin.

8.1 CONDICIONES DE FABRICACIÓN Y COMPACTACIÓN.

La fracciones de fresado establecidas y controladas han sido 0/8 y 8/25 mm, descartando todo el material que retiene el tamiz de corte mayor. Las temperaturas de compactación seleccionadas han sido: 40, 50 y 60 ºC. En este caso se han incrementado las temperaturas de compactación respecto al primer estudio.

Para realizar la compactación se ha utilizado la compactadora giratoria y se han aplicado las mismas condiciones de compactación para todas las probetas fabricadas: Energía de compactación, ángulo de giro, velocidad de giro y cantidad de mezcla.

8.2 ENSAYOS REALIZADOS.

Previamente se caracterizo el fresado a emplear en este estudio, tanto el todo uno como las fracciones establecidas, mediante: análisis granulométricos (UNE EN 933-1), contenidos de ligante en mezclas bituminosas (NLT-164), penetración del ligante recuperado (NLT-124), punto de reblandecimiento del ligante recuperado (NLT-125).

Los ensayos mecánicos empleados para caracterizar estas nuevas variaciones han sido también los mismos que antes: densidad en superficie seca saturada, modulo rigidez a tracción indirecta, resistencia a tracción indirecta y humedad.

8.3 TIPO DE EMULSIÓN EMPLEADA.

Se empleó una emulsión para reciclado en frío tipo ECL2b Rejuvenecedora, con un 60,3% de ligante base rejuvenecedor de penetración 200 -250 dmm.

8.4 DISEÑO Y FORMULACIÓN DE LA MEZCLA RECICLADA EN FRÍO DE ALTAS PRESTACIONES INICIALES (RFE. API).

Se ha realizado el ensayo de inmersión – compresión (I-C), NLT-163, para determinar los porcentajes de emulsión a emplear en los estudios realizados.

La humedad de compactación se determinó mediante el ensayo Proctor modificado, según UNE 103501, sobre el material a reciclar, resultando un contenido óptimo de fluidos del orden del 5,5 %.

Como aditivos se ha añadido un 1,5 % de cemento 32,5N y otro no hidráulico en proporciones < 0,1%.

Los resultados del ensayo de Inmersión-Compresión se muestran a continuación (Tabla 16).

% Emulsión	Húmedo / Seco	Densidad g/cm³	Resistencia MPa	% Resistencia Conservada
2,5	H	2,388	3,00	74,8
	S	2,388	4,01	
3	H	2,387	2,95	75,9
	S	2,395	3,90	
3,5	H	2,394	2,69	77,0
	S	2,390	3,50	
4	H	2,379	2,51	80,0
	S	2,377	3,10	

Tabla 16. Resultados del ensayo de Inmersión-Compresión.

A partir, de un 3% de emulsión bituminosa añadida cumple con los mínimos exigidos por el PG4 para la categoría de tráfico T1.

8.5 INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN DE LA MEZCLA RECICLADA EN FRÍO EN SUS PROPIEDADES.

La dosificación empleada, para realizar este estudio se recoge en la Tabla 17.

Tipo	RFE API
Fresado	100 %
Emulsión ECL-2 REJUV.	4 %
Agua Preenvuelta	1 %
Cemento	1,5 %
Aditivo	< 0,1 %

Tabla 17. Dosificación empleada RFE. API.

Las temperaturas de compactación fueron 40, 50 y 60 ºC, y las proporciones de cada fracción de fresado: 48% de la fracción 0/8 mm. y 52% de la fracción 8/25 mm.

8.5.1 Densidades volumétricas frente a la temperatura de compactación.

Las densidades volumétricas obtenidas en función de la Temperatura, se indican en la Tabla 18. En ellas se confirma el plateau observado a los 40ºC y que se produce hasta los 50ºC. A partir de esta Temperatura de nuevo se observa un incremento de Densidades típico de los sistemas Templados.

RFE API	Densidad Volumétrica (Kg/m³)		
Temperatura	40 ºC	50 ºC	60 ºC
Promedio	2274	2275	2309

Tabla 18. Resultados Densidad volumétrica de las probetas fabricadas a distinta temperatura de compactación.

8.5.2 Modulo de Rigidez a Tracción Indirecta (UNE EN 12697 – 26, Anexo C) frente a la Temperatura de compactación.

Los resultados obtenidos se indican en la Tabla 19 y en la Figura 26.

MODULO RIGIDEZ A DIFERENTE TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN SEGÚN UNE EN 12697- 26 (Anexo C), 20ºC											
40 ºC				50 ºC				60 ºC			
24 h	48 h	72 h	216 h	24 h	48 h	72 h	216 h	24 h	48 h	72 h	216 h
810	997	1256	2026	1447	1703	2119	2190	1952	1982	2136	2865

Tabla 19. Modulo Rigidez de las probetas de RFE. API fabricadas a distinta temperatura de compactación.

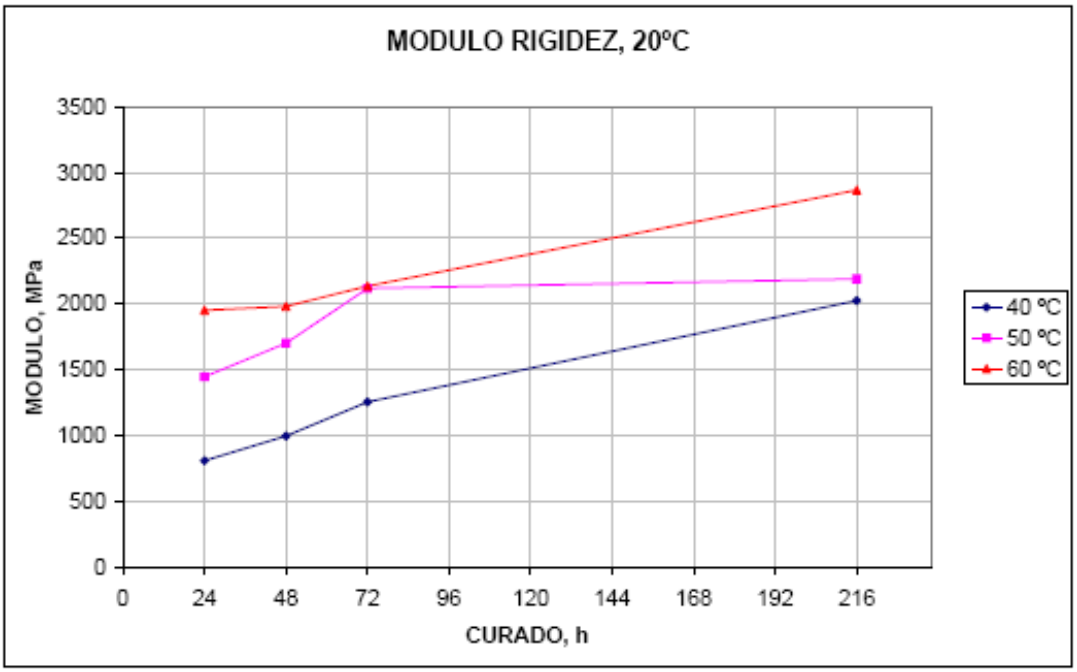


Figura 26. Modulo Rigidez del RFE. API a distinta temperatura de compactación vs. Tiempo de curado.

8.5.3 Resistencia a Tracción Indirecta a diferente temperatura de compactación según su evolución de curado en el tiempo.

Los resultados obtenidos se indican en la Tabla 20 y en la Figura 27.

RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA A DIFERENTE TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN SEGÚN UNE EN 12697- 23, 15 ºC.											
40 ºC				50 ºC				60 ºC			
24 h	48 h	72 h	216 h	24 h	48 h	72 h	216 h	24 h	48 h	72 h	216 h
0,66	0,72	0,82	0,87	0,68	0,71	0,86	0,95	0,86	0,90	1,04	1,21

Tabla 20. Resultados Resistencia a Tracción Indirecta de las probetas de RFE. API compactadas a distinta temperatura.

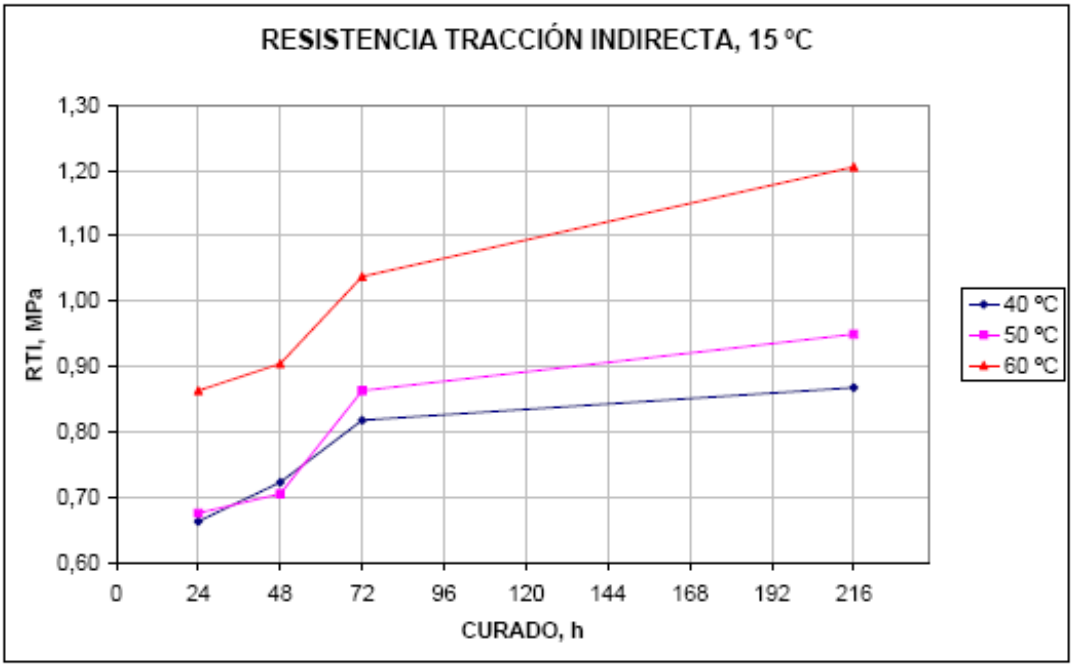


Figura 27. RTI del RFE. API a distinta temperatura de compactación vs. Tiempo de curado.

8.5.4 Humedad del RFE. API según evoluciona el tiempo de curado:

Las probetas rotas a tracción indirecta se han utilizado para ver su humedad, mediante secado en estufa según NLT-102.

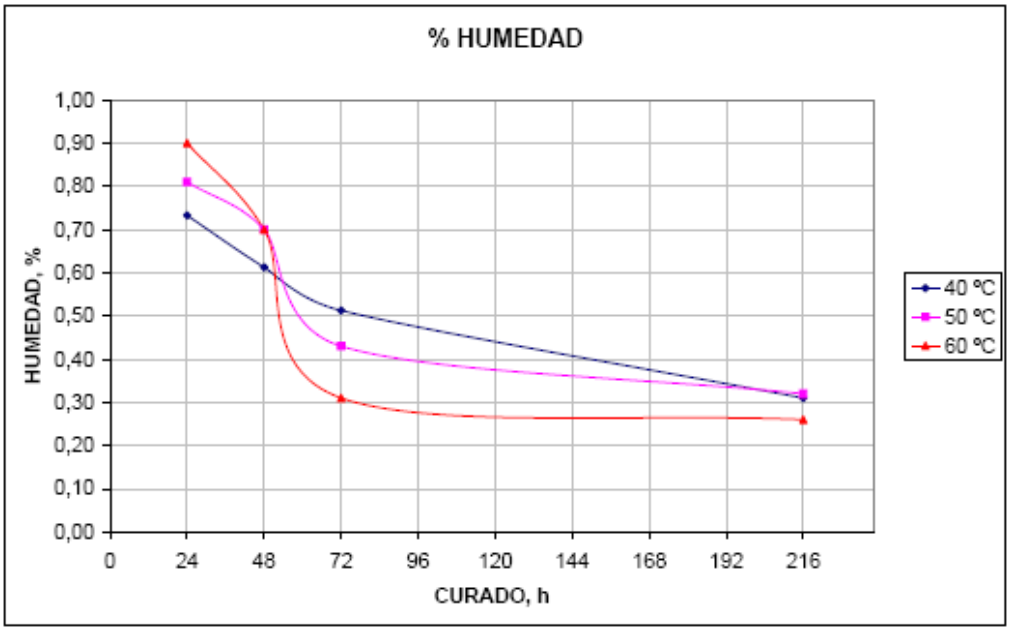


Figura 28. Porcentaje de Humedad RFE. API vs. Tiempo de curado (horas)

En todos los casos, las propiedades mecánicas (Módulo y Resistencia a Tracción Indirecta) se incrementan con las Temperaturas de Compactación, mientras que disminuye la humedad.

8.5.5 Comparación de resultados del RFE. API: Dosificación todo uno vs. Dosificación en fracciones.

Utilizando el fresado en el estudio preliminar, se comprobó la diferencia de propiedades mecánicas utilizando el fresado dosificado sin fracciones (Todo Uno) y con fresado dosificando mediante las dos fracciones conocidas (0/8 y 8/25 mm _ Fracciones).

Las condiciones de compactación de las mezclas fue la misma, compactador giratorio, y la temperatura de compactación fue 30 ºC. La dosificación empleada fue la que se muestra en la siguiente tabla:

Componentes	Dosificación Todo Uno / Fracciones*
Fresado	100 %
Emulsión	3 %
Agua	1,5 %
Cemento	1,5 %
Aditivo	< 0,1 %

Tabla 21. Dosificación de los RFE.

* 48% de 0/8 mm + 52% de 8/25 mm.

Se realizaron los mismos ensayos que los expuestos anteriormente: densidad, modulo rigidez y resistencia a tracción indirecta en función del tiempo de curado.

A continuación se muestran los resultados (Tabla 22 y Figuras 29 y 30), de manera comparativa, utilizando las mismas condiciones de ensayo, de las dos mezclas.

		Modulo Rigidez, 20 ºC, MPa				Resistencia Tracción Indirecta, 15ºC, MPa			
Tipo	Densidad, g/cm³	24	48	96	144	24	48	96	144
Todo Uno	2,366	1478	2115	2651	3150	0,64	0,71	1,00	1,06
Fracciones	2,363	1567	1941	2578	3078	0,73	0,86	0,99	1,12

Tabla 22. Resultados RTI y Modulo RFE. API Todo Uno y Fracciones.

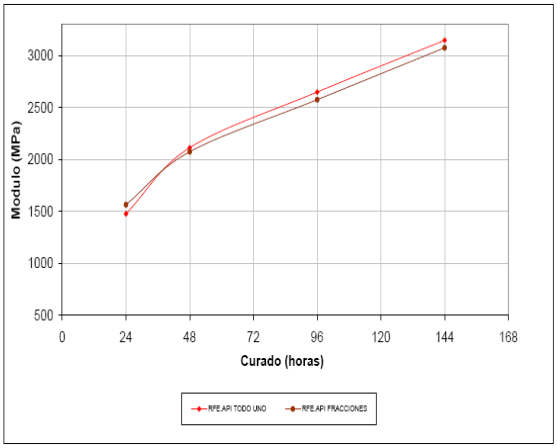


Figura 29. Modulo Rigidez

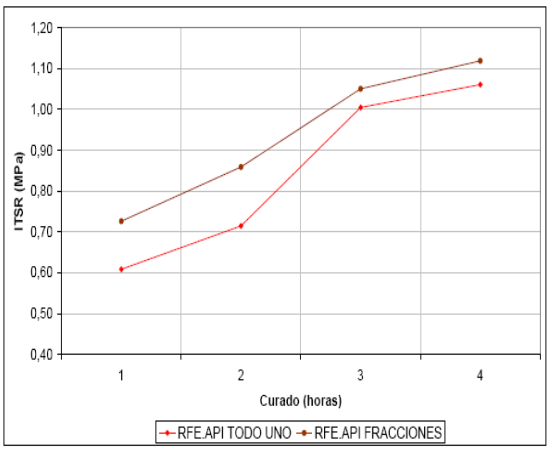


Figura 30. Resistencia a Tracción Indirecta

Las graficas muestran valores de modulo de rigidez muy parecidos, pero existe diferencia en cuanto a cohesión de la mezcla medida mediante resistencia a tracción indirecta. Existe alta dispersión de resultados cuando no se dosifica con las fracciones preestablecidas y controladas, de esta forma se pueden obtener propiedades constantes de la mezcla reciclada con emulsión.

9. CONCLUSIONES.

Los Reciclados de firmes in situ con emulsión (RFE), constituyen una técnica de rehabilitación de carreteras con un gran atractivo económico y medioambiental, debido a su bajo consumo de materias primas constituyentes, reducidos consumos de energía y generación de emisiones y ausencia de residuos. No obstante, presentan una serie de inconvenientes que limitan su aplicación, ligados a la necesidad de un periodo de curado inicial antes de su puesta en servicio o cubrición con capa de mezcla bituminosa, y a unas prestaciones iniciales, mecánicas y cohesivas, inferiores a las que presentan a posteriori, medio y largo plazo.

El estudio muestra una mejora de estas prestaciones mecánicas y acortamiento de los plazos de curado o maduración, que tienen por tanto un gran interés para acercar su campo de aplicación al de las mezclas convencionales y extender su aplicación.

Se presenta en este trabajo los estudios que demuestran la influencia determinante en las mejoras antes citadas que tiene una nueva variable a tener en cuenta, que es la temperatura de la mezcla en el momento de su puesta en obra y compactación. Esta variable determina las características de la mezcla, en cuanto a prestaciones mecánicas, cohesión y compacidad tanto iniciales como las obtenidas finalmente a lo largo de su periodo de maduración.

Con ello, se puede establecer un nuevo parámetro en la ejecución de cada formulación de reciclados de altas prestaciones a edad temprana, cual es la

temperatura de puesta en obra de la mezcla en el momento de la compactación, por encima de la cual las prestaciones buscadas en el RFE estarían aseguradas.

Este estudio se pone de manifiesto la evolución de las propiedades de las mezclas de RFE con el tiempo, al mismo tiempo que la misma mezcla compactada a distinta temperatura presenta diferentes propiedades y que la adición de aditivos influye directamente en sus características.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1]-Revista Carreteras, de Noviembre- Diciembre 95, nº 80- Artículo sobre la obra de Cañaveral-Cáceres

[2]- Reciclado con rejuvenecedores de los pavimentos de las carreteras. Aplicación al tramo Guadix-Granada de la A92. I Congreso Andaluz de Carreteras. Granada 1998.

[3]- Reciclado en frío con emulsión en la Autovía A92, en Granada. Seguimiento y evolución de las mezclas.

[4] Experiencias en la puesta en obra en la rehabilitación de la A92, tramo Loja – Moraleda de Zafayona. Jornadas sobre técnicas de Reciclado de materiales para capas de firme. Granada 2000.

[5] Proyecto de i+d para el desarrollo de una nueva formulación de reciclados en frío con emulsión de firmes bituminosos con altas prestaciones iniciales para la rehabilitación de firmes en autopistas y carreteras de alta capacidad.

[6] Tarea 8 Reciclados en Frío (Proyecto Fénix). Subtarea 8.3 y 8.4.

AUTORES

Carlos Garcia (Collosa), Silvia Estebaranz (Collosa), Sonia Alvarez (Collosa), Antonio Páez (Repsol), Antonio Pérez (Repsol), Alberto Moral (Cartif), Laura López (Cartif), Mª Jose Hernandez (Cidaut), Baltasar Rubio (Cedex), Félix E. Pérez (Universidad Politécnica de Cataluña), Ramón Botella (Universidad Politécnica de Cataluña), Francisco José Martínez (Universidad de Huelva), Juan José Potti (Coordinador del Proyecto Fénix), José Luis Peña (Coordinador del Proyecto Fénix)

RESUMEN

El objetivo de esta línea de investigación es investigar sobre nuevas tecnologías que permitan fabricar mezclas bituminosas a partir de subproductos obtenidos de diferentes procesos de fabricación que en la actualidad se consideran residuales, intentando valorizarlos al máximo aumentando las prestaciones de la carretera. Todo influirá en el análisis del ciclo de vida (ACV) de las propiedades residuales y de las mezclas bituminosas, con lo que ello implica en la sostenibilidad de las carreteras,

1. INTRODUCCIÓN.

La utilización de subproductos puede ayudar a conservar los recursos naturales al reducir la demanda de materias primas convencionales. Al mismo tiempo puede ayudar a preservar el medio ambiente, ya que permite la reducción del vertido de residuos causantes de graves problemas medio ambientales.

Los subproductos que se han estudiado para la fabricación de mezclas bituminosas han sido los NFU (por vía seca, húmeda y mixta) y las escorias de acerías como sustitutas de áridos.

Tras la evaluación ambiental realizada al proceso de fabricación de mezcla bituminosa, la etapa de calentamiento y secado de áridos ha sido identificada como la etapa más impactante que se lleva a cabo en planta desde el punto de vista ambiental.

Este hecho hace que un estudio comparativo de la posible incorporación de combustibles alternativos a los convencionales (gas natural y fuel oil) pueda aportar potenciales beneficios ambientales que podrían derivar en una mejora global del proceso

2. ESCORIAS DE ACERIAS.

Las escorias estudiadas proceden del proceso de fabricación del acero en las acerías de horno de arco eléctrico. Se estima que en España se producen cerca de 2 millones de toneladas de escorias de acería de horno de arco eléctrico (aproximadamente el 80% escorias negras y el 20% escorias blancas) en las 25 acerías de este tipo existentes a lo largo de toda la geografía española, principalmente en el País Vasco (en esta comunidad a lo largo del 2003 se generaron 800.000 toneladas de estas escorias).

Con respecto a su composición química, expresada en óxidos, las escorias están formadas principalmente por óxidos de silicio, aluminio, calcio y magnesio, que comprenden aproximadamente el 95% del total. La composición mineralógica depende del tipo de enfriamiento al que hayan sido sometidas. Cuando se someten las escorias a un enfriamiento muy rápido, éstas son mayoritariamente vítreas, mientras que si el enfriamiento es lento se obtiene una mezcla sólida estable compuesta por silicoaluminatos cálcicos y magnésicos. En concreto, las escorias negras están compuestas principalmente por hierro, calcio, silicio y aluminio, mientras que las escorias blancas son ricas en calcio y silicio y tienen contenidos mucho menores en hierro.

Las principales fases cristalinas de las escorias de horno eléctrico son la gahelenita (óxido de calcio, aluminio y silicio), la aquermanita (óxido de calcio, magnesio y silicio) y el silicato dicálcico.

Aquí cabe señalar que para el uso concreto de estas escorias como áridos en carreteras, únicamente deberían emplearse las escorias negras, es decir, las procedentes del proceso de fusión, ya que las escorias blancas poseen gran cantidad de cal (de ahí su color), que podría provocar problemas de hinchamiento y expansión una vez puesta en obra la mezcla con escorias. Evidentemente, esto induciría a la formación de grietas, socavones, etc. en la carretera.

En el caso concreto de las tres muestras de escoria que se analizan en este trabajo, proceden de acerías que se han percatado de la importancia de no mezclar las escorias blancas con negras, por lo que tenemos la seguridad de que las muestras que nos llegan proceden únicamente del proceso de metalurgia primaria.

Las escorias que han sido analizadas en este trabajo proceden de tres acerías de horno de arco eléctrico situadas en Madrid y Santander. En concreto, se trata de materiales procedentes de:

- Corrugados Getafe, S.L., del Grupo Alfonso Gallardo. Esta acería se encuentra situada en Getafe (Madrid) y está especializada en la fabricación de barras de acero corrugadas,
- Arcelor Mittal Madrid, S.L., acería del grupo Arcelor situada, como su nombre indica, en la comunidad de Madrid, concretamente en Villaverde. En esta

empresa fabrican diferentes tipos de acero, no obstante, esto se logra modificando los aditivos que se añaden al acero durante el proceso de afino, y durante la metalurgia primaria, por lo que el fabricar un tipo u otro de acero influirá en la composición de las escorias blancas, pero en ningún caso de las negras.

- Global Steel Wire, S.A. (GSW), empresa perteneciente al grupo Celsa, que se encuentra ubicada en Santander. En la actualidad esta empresa valoriza el total de las escorias que produce.

2.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS ESCORIAS

Las tres muestras de escorias fueron homogeneizadas y cuarteadas con el fin de obtener la suficiente cantidad de muestra para realizar los ensayos de caracterización.

En la siguiente imagen se muestra el aspecto de las escorias

Figura 1. Aspecto de las escorias de Corrugados Getafe (izquierda), Arcelo Mittal (centro) y GSW (derecha)

En el caso de la escoria de Corrugados Getafe, ésta está constituida por partículas de color negro, angulosas y porosas. Se puede apreciar, en la mayoría de las partículas, zonas oxidadas.

La escoria de Arcelor Mittal presenta un color negro-rojizo. Las partículas, en su mayoría de aspecto oxidado, presentan en ocasiones una textura rugosa y porosa, aunque también hay partículas con textura lisa. Se observa también la presencia de algunas partículas blanquecinas y otras de color “plateado”, aunque éstas están presentes en un porcentaje pequeño.

En cuanto a las escorias de GSW, éstas son de color gris, observándose también zonas oxidadas en algunas partículas. En este caso, al igual que en la muestra de Arcelor Mittal, hay partículas rugosas y partículas lisas. Se observa también la presencia de algunas partículas blancas, que no se corresponderían con escorias de acería.

Para determinar las características químicas del material, se llevó a analizar a los laboratorios de GEOCISA (Geotecnia y Cimientos, S.A.) y del CEDEX. La determinación de sulfuros totales y cal libre, así como la proporción en compuestos totales de azufre, sulfatos solubles en agua y en ácido, se realizó el ensayo según la norma UNE-EN 1744-1. La determinación de óxido de magnesio se llevó a cabo según lo marcado en la norma UNE-EN 196-2.

Los resultados de este ensayo aparecen indicados en la figura 2, se indican también los datos suministrados por las propias acerías, así como otros encontrados en la bibliografía para diversas acerías del territorio español. Como se puede observar, en todos los casos las escorias negras poseen una composición química similar.

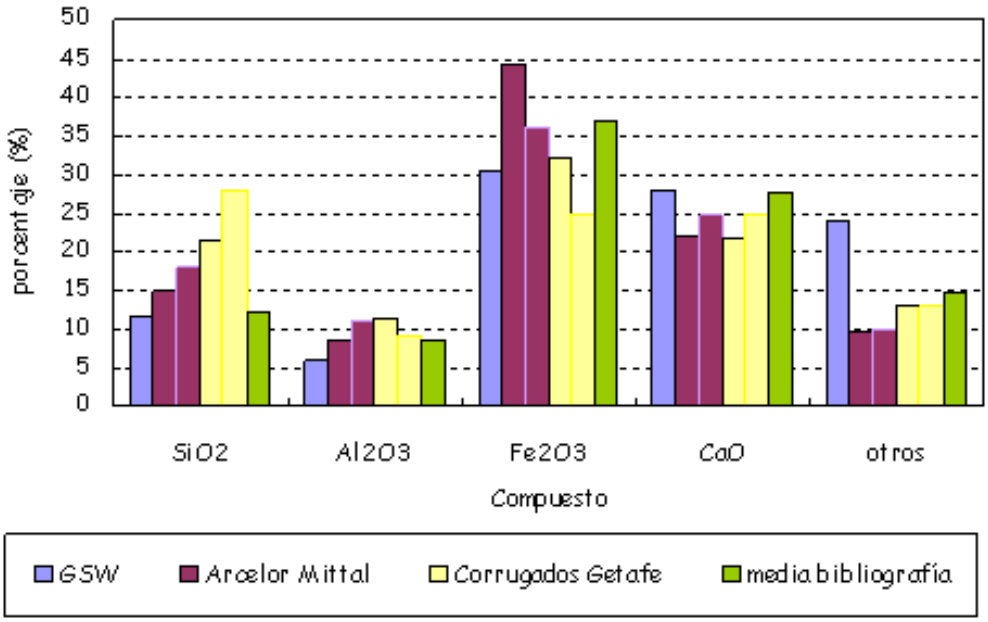


Figura 2. Composición química de las tres muestras de escorias analizadas

La proporción de CaO en las tres escorias negras analizadas está en torno al 30%, lo que indica el carácter fuertemente básico de las mismas que garantiza una buena adhesividad de las escorias con los betunes. La cal libre es un compuesto inestable que puede generar expansividad en las escorias, cuando la cal libre por acción del agua pasa a cal hidratada. La existencia de óxido de magnesio libre tiene los mismos efectos que la cal libre.

A pesar de que los contenido en CaO de las tres escorias son elevados, el porcentaje de cal libre (calculado según la norma UNE-EN 1744-1) y de magnesia libre (calculado según la norma UNE-EN 196-2) en las tres escorias son muy pequeños, por lo que no deberían presentarse problemas de hinchamiento. En concreto, la cal libre se encuentra en pequeñas cantidades para la escoria de Corrugados Getafe (CaO libre< 0,1%), y la escoria de ArcelorMittal (CaO libre=0,32%). La escoria de GSW presenta un valor mayor (CaO libre=0,74%).

Así mismo, se ha medido el contenido en azufre de las tres escorias, según la norma UNE-EN 1744-1. Tabla 1

Muestra	Sulfatos solubles en agua (%SO_3)	Sulfatos solubles en ácido (%SO_3)	Azufre total (%SO_3)	Sulfuros (%SO_3)
Corrugados Getafe	0.005	0.13	0.14	0.05
Arcelor Mittal	0.004	0.22	0.24	0.05
GSW	<0.002	0.40	0.46	0.13

Tabla 1. Contenidos en compuestos de azufre de las tres muestras de escorias estudiadas

A pesar de los bajos contenidos en cal y magnesia libre de las escorias, a fin de asegurarnos que no se producirán problemas derivados de su expansión se sometió la muestra de escorias a un ensayo de hinchamiento. Para ello, se ha seguido la norma UNE-EN 1744-1. En este método de ensayo se determina la susceptibilidad a la expansión de la escoria, producida por la hidratación lenta de la cal libre y/o del óxido de magnesio

	Escoria Corrugados Getafe		Escorias de Arcelor Mittal		Escoria de GSW	
Tiempo de ensayo	Variación de volumen (%)		Variación de volumen (%)		Variación de volumen (%)	
24 horas (1 día)	Molde 1	0.07	Molde 1	-0.07	Molde 1	0.12
	Molde 2	0.10	Molde 2	-	Molde 2	
168 horas (7 días)	Molde 1	0.92	Molde 1	0.22	Molde 1	0.36
	Molde 2	1.52	Molde 2	-	Molde 2	

Tabla 2. Resultados del ensayo de hinchamiento

Estos criterios de expansividad los cumplen las tres escorias estudiadas

Las tres muestras de escoria se sometieron a un ensayo de alterabilidad, a fin de determinar el grado de envejecimiento de la escoria. Se ha seguido el procedimiento detallado en la norma NLT 361/91

Ensayo		Corrugados Getafe	Arcelor Mittal	GSW
Determinación del grado de envejecimiento, I.G.E.	Muestra 10/20 mm	0.03	0.06	0.06
	Muestra 5/10 mm	0.03	0.42	0.07

Tabla 3. Resultados del ensayo de envejecimiento

Se especifica que el IGE según la norma NLT-361 será inferior al 1%. Esta propiedad, por tanto, la cumplen sobradamente las tres escorias estudiadas.

Respecto a las propiedades mecánicas de las escorias negras, se realizaron los ensayos en los laboratorios de Collosa y CEDEX de Desgaste de Los Ángeles UNE-EN 1097-2:1999, Índice de Lajas UNE-EN 933-3:1997 y Pulimento Acelerado UNE-EN 1097-8 en el laboratorio de EUROCONSULT

Propiedad	Escorias negras				Áridos naturales	
	C. Getafe	AM	GSW	Bibliografía	Basalto	Granito
Desgaste Los Ángeles (%)	32	25,2	20,5	15-20	9-20	12-27
Coeficiente de pulimento acelerado, CPA	47	60	63	54-57	45-56	45-58
Índice de lajas (%)	1,20%	3,52	2,65	-	-	-
Absorción de agua (%)	1,49	0,63	1,02	0,3-0,9	<0,5	0,3-1,2
Densidad relativa (kg/cm^3)	3,19	3,37	3,68	≈3,5	≈2,9	≈2,7

Tabla 4. Propiedades mecánicas de las escorias analizadas

Los áridos que se empleen en capas de rodadura fabricadas con MB tipo hormigón bituminoso (Artículo 542) deben presentar un desgaste Los Ángeles, calculado según norma UNE-EN 1097-2, ≤20 (tráficos T00 a T2) y ≤25 (tráficos T3, T4 y arcenes). Para áridos que vayan a emplearse en mezclas bituminosas discontinuas y drenantes (Artículo 543), las prescripciones respecto al desgaste de Los Ángeles son más exigentes

Respecto a la resistencia al pulimento (UNE-EN 1097-8), y según las especificaciones recogidas en los Artículos 542 y 543, la escoria de Corrugados Getafe que presenta un CPA = 47 podría emplearse como árido siderúrgico, en

mezclas bituminosas, para tráficos T32, T4 y arcenes (CPA ≥ 44). Las otras dos escorias presentan un valor de CPA excelente, ArcelorMittal con un CPA = 60 y GSW con un CPA = 63, podrían emplearse para todo tipo de tráficos.

El resto de propiedades estudiadas cumplirían las especificaciones recogidas en los artículos del PG-3. Este tipo de material tiene buena forma, presenta un índice de lajas muy bajo (IL=1,20%). En el artículo 542, se exige un índice de lajas ≤20 (T00), IL ≤25 para tráficos T0 a T31 e IL ≤30 para tráficos T32, T4 y arcenes. En el artículo 543, las especificaciones del índice de lajas varían entre IL≤20-25, en función del tipo de la categoría de tráfico y el tipo de mezcla discontinua o drenante. Las escorias de Corrugados Getafe, cumplen sobradamente esta especificación.

2.2 CONSIDERACIONES MEDIOAMBIENTALES

Las escorias de acería de horno de arco eléctrico están incluidas en el Catálogo Europeo de Residuos (aprobado mediante la decisión 94/36/CE) con el código 10 02 02 “Escorias no tratadas procedentes de la industria del hierro y del acero”, estando caracterizadas como residuo no peligroso.

Se ha realizado el ensayo de lixiviados de las tres muestras de escorias, según la norma UNE-EN 1744-3: Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Este ensayo se ha realizado en el CEDEX.

Parámetro	Muestra			
	Blanco	Escoria Arcelor Mittal	Escoria Corrugados Getafe	Escoria GSW
Conductividad µS/cm	105,5	204,0	158,4	153,6
pH	4,69	8,74	7,85	8,64
Na (ppm)	0,453	2,286	1,641	1,006
K (ppm)	<0,062	1,496	0,789	0,242
Ca (ppm)	0,395	20,936	7,988	22,639
Mg (ppm)	0,022	0,132	0,677	0,052
F^- (ppm)	0,01	0,22	0,05	0,47
Cl^- (ppm)	0,72	2,88	0,73	1,91
NO_2^- (ppm)	<0,01	0,12	<0,01	<0,01
Br^- (ppm)	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03
NO_3^- (ppm)	5,78	5,02	2,09	3,50
SO_4^{--} (ppm)	0,93	8,01	5,13	4,98
Al (ppm)	<0,042	1,161	0,182	4,413
As (ppm)	<0,016	<0,016	<0,016	4,413
Ba (ppm)	0,005	0,225	0,178	0,050
Cd (ppm)	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Cr (ppm)	<0,002	<0,002	<0,002	0,003
Cu (ppm)	0,003	0,003	0,004	0,004
Hg (ppm)	<0,006	<0,006	<0,006	<0,006
Ni (ppm)	<0,006	<0,006	<0,006	<0,006
Pb (ppm)	<0,016	0,037	<0,016	<0,016
Se (ppm)	<0,018	<0,018	<0,018	<0,018
V (ppm)	<0,001	0,032	0,008	0,026
Co (ppm)	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002
Zn (ppm)	0,031	0,048	0,031	0,029
Fe (ppm)	0,014	0,025	0,063	0,032
Mn (ppm)	0,007	0,003	0,012	0,004
Mo (ppm)	<0,002	0,005	<0,002	<0,002
Sb (ppm)	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015
Ti (ppm)	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002

Tabla 5. Ensayo de lixiviación, conductividad, pH y concentración de cationes y aniones

Los resultados obtenidos se han comparado con la normativa técnica alemana en materia de construcción de carreteras TL Gestein-StB 04, Condiciones técnicas de suministro de áridos para la construcción de carreteras (Technische Lieferbedingungen fur Gesteinskornungen im Straßenbau), para encontrar limitaciones en función del uso al que se destinen las escorias acería. Con estos resultados se puede afirmar que las exigencias medioambientales son satisfactorias.

2.3 DISEÑO DE UNA MEZCLA QUE INCORPORE ESCORIAS NEGRAS EN SUSTITUCIÓN DE LOS ÁRIDOS NATURALES

Para cada una de las tres muestras de escorias se ha diseñado una mezcla bituminosa de tipo AC16 surf 50/70-S para capa de rodadura, que incorpore este subproducto en sustitución de parte de los áridos de machaqueo convencionales. Con fines comparativos se fabricó también una mezcla AC16 surf 50/70-S empleando en este caso un 100% de áridos naturales de machaqueo. A continuación se muestra la dosificación y resultados obtenidos para cada una de las mezclas que incorporan escorias, y se comparan los resultados obtenidos con los presentados por la mezcla convencional de referencia.

Proporción (%)	Árido natural			Escoria			Filler
	0/5	5/11	11/16	0/5	5/11	11/16	
Mezcla convencional	40	40	15	-	-	-	5
Mezcla con escoria Getafe	15	30	15	34	-	-	6
Mezcla con escoria GSW	-	-	-	55	20	18	7
Mezcla con escoria AM	-	34	-	20	7	35	4

Tabla 6. Dosificación de la mezcla AC16 suf 50/70-S con las diferentes escorias.

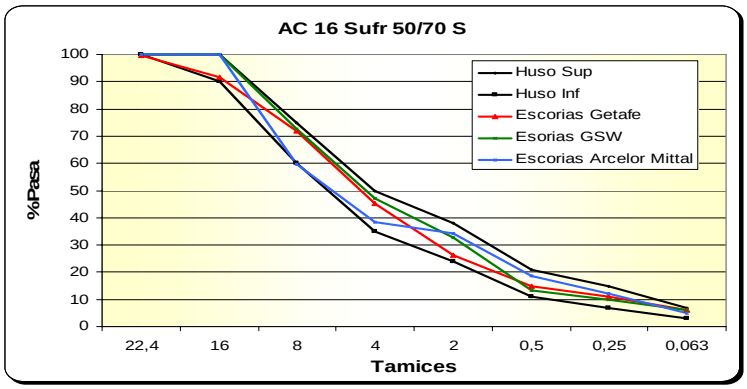


Figura 3. Huso de la mezcla AC 16 Surf 50/70 S de las escorias

Mezcla AC16 surf 50/70-S				
Propiedad	Getafe	GSW	AM	Áridos de machaqueo
% ligante	4,6	4,1	3.8	5
Densidad (g/cm3)	2,44	3,2	2.8	2.35
Estabilidad (kN)	13,8	17,1	13.7	16.5
Deformación (mm)	2,6	1,95	2.8	2.9
Huecos en mezcla (%)	6,4	5,9	6.4	5.4
Huecos en áridos (%)	17,3	18,2	16.7	16.2
ITSR (%)	97.6	95.3	96,2	93,3
WTS (mm)	-	0,039	0,036	0,104

Tabla 7. Propiedades de las mezclas AC 16 surf 50/70-S con escorias

Los mejores resultados son los obtenidos con la escoria GSW, cumpliendo con las especificaciones del PG-3, además es la mezcla que mayor porcentaje de escoria admite, con un 100% de sustitución de áridos de machaqueo. Lo que permite un mayor empleo de subproducto. Esta mezcla puede ser empleada en capas de rodadura, dependiendo del tipo de tráfico de la vía.

Se han realizado ensayos de caracterización experimental de la absorción acústica de mezclas AC-16 y PA-16 con las escorias de GSW y AM, estos ensayos han sido realizados por Cidaut.

Para ello, se han realizado medidas del coeficiente de absorción acústica con el tubo de impedancia de seis series de probetas de sección circular construidas en laboratorio:

	Mezcla AC16-S			**Mezcla PA-16**		
	Betún		**Escoria %**	**Betún**		**Escoria %**
	%	**Tipo**		**%**	**Tipo**	
Arcelor AM	3.8	50/70	86.0	4.4	BM3c	80.0
GSW	4.0	50/70	100 (sin áridos de machaqueo)	3.7	BM3c	100 (sin áridos de machaqueo)
Referencia	5.0	50/70	Sin escorias – Áridos de machaqueo de tamaño 5/11 de la cantera de Corcos	4.3	BM3c	Sin escorias – Áridos de machaqueo de tamaño 5/11 de la cantera de Corcos

Tabla 8. Mezclas AC-16S y PA-16 estudiadas en acústica

Las conclusiones relativas a la determinación de la absorción acústica de las mezclas bituminosas fabricadas con escorias son:

- Las mezclas bituminosas con escorias de GSW, tanto la mezcla tipo AC16 surf 50/70-S como la tipo PA-16, en general no ven modificados sus valores de absorción acústica

- En las mezclas bituminosas con escorias de AM, Se observa que en el caso de la mezcla tipo AC16 surf 50/70-S, la sustitución de parte de los áridos por escorias provoca el incremento de la absorción acústica y que el máximo de absorción acústica se desplace hacia frecuencias superiores. Esto puede ser debido a la diferente naturaleza existente entre los áridos y las escorias. Por otra parte, hay que mencionar que este tipo de mezcla bituminosa AC16 surf 50/70-S con escorias de AM poseen un porcentaje de huecos superior al resto de las mezclas tipo AC16 surf 50/70-S, lo que puede justificar el incremento de la absorción acústica.

- Mientras que en el caso de la mezcla tipo PA-16 se produce una ligera disminución del máximo de absorción acústica y que éste se desplace hacia frecuencias inferiores. Mencionar que las probetas de la mezcla tipo PA-16 con escorias de AM presentan una alta dispersión.

También se ha realizado un estudio para la evolución del comportamiento de la escoria GSW, en dos tipos de mezcla bituminosa de uso habitual en capas de rodadura (AC16S y PA16).El Centro de Estudios del Transporte se encargó de realizar los ensayos de caracterización de las mezclas bituminosas para capa de rodadura, mediante medida de la resistencia a la fisuración por fatiga y módulo dinámico a flexión en cuatro puntos sobre probetas prismáticas, así como ensayos de sensibilidad al agua y módulo resiliente a tracción indirecta, tanto en las mezclas originales como después de sometidas a un proceso de envejecimiento térmico en estufa a 85º C durante cinco días. Como mezclas de referencia se han ensayado dos mezclas equivalentes fabricadas con áridos silíceos convencionales.

Los módulos dinámicos a flexión en cuatro puntos, determinados a 20° C y 10 Hz, ponen de manifiesto que la mezcla AC16S fabricada con escoria presenta un módulo mucho más elevado y un ángulo de desfase ligeramente menor que la mezcla equivalente fabricada con árido silíceo convencional. Por el contrario, las mezclas drenantes PA16, fabricadas tanto con escoria GSW como con árido silíceo convencional, presentan valores de módulo dinámico y de ángulo de desfase sensiblemente similares.

Esta diferencia de comportamiento entre las dos mezclas se ha corroborado también con la medida del módulo resiliente a tracción indirecta y con la del módulo dinámico M50, medido tanto experimentalmente como extrapolado a partir de las relaciones módulo-deformación obtenidas de los ensayos de fatiga a flexión.

Las diferencias de comportamiento de la escoria entre ambas mezclas de cada tipo se han atribuido, por un lado, al distinto grado de compactación alcanzado en las probetas ensayadas, y por otro, a cambios significativos en el contenido de filler de las dos mezclas.

Los ensayos de fatiga en deformación de las mezclas AC16S, proporcionan valores de deformación para un millón de ciclos ($\varepsilon 6$) muy similares con ambas mezclas, en el entorno de 195 µm/m. El punto de corte de ambas rectas se produce a un valor de ε muy próximo a los de $\varepsilon 6$, y la mezcla fabricada con árido silíceo convencional presenta una recta con pendiente menor en valor absoluto a la de la mezcla con

escoria. Ello significa que las resistencias a la fisuración de las dos mezclas son del mismo orden de magnitud para deformaciones en el entorno del millón de ciclos; para valores de deformación menores que ε6, la mezcla con escoria presenta un mejor comportamiento y para deformaciones mayores que ε_6 es la mezcla con árido silíceo convencional la que tiene una mayor resistencia a la fatiga.

En consecuencia no es posible determinar si el comportamiento al agrietamiento por fatiga de la mezcla con escoria es mejor o peor que el de una mezcla equivalente con árido silíceo convencional, ya que esta propiedad depende del nivel de deformaciones al que está sometida la mezcla, que vendría determinado por el tipo y estructura del firme, así como por la posición de la capa bituminosa en dicha estructura.

Todas las mezclas ensayadas presentan, antes del envejecimiento, una buena resistencia a la acción del agua, obteniéndose porcentajes de resistencias conservadas superiores al 85 % exigido en los artículos 542 y 543 para este tipo de mezclas.

El envejecimiento acelerado, durante cinco días en estufa a 85º C produce, en todas las mezclas ensayadas, un aumento de la rigidez, con un incremento de la resistencia a tracción indirecta de aproximadamente el 10-15 %. En la mezcla drenante fabricada con árido silíceo convencional, el aumento experimentado es aún superior.

El envejecimiento produce, como se acaba de señalar, un aumento de la rigidez tanto en las mezclas bituminosas fabricadas con escorias como con árido silíceo convencional. Sin embargo, no parece tener una influencia negativa sobre las mezclas en cuanto a su resistencia a la acción del agua, ya que en general los índices de resistencia conservada son muy elevados en las probetas originales y en las envejecidas. Únicamente la mezcla fabricada con árido silíceo convencional, cuando se envejece en las condiciones descritas en este trabajo, presenta una disminución significativa de la resistencia conservada a tracción indirecta, obteniéndose un valor de 82 %, que es sólo ligeramente inferior al limite del 85 % establecido para mezclas originales.

En definitiva, el comportamiento de la escoria GSW en los dos tipos de mezclas bituminosas estudiados parece ser similar al del árido silíceo convencional. Las diferencias detectadas en la medidas de módulos resilientes pueden atribuirse a unos contenidos de polvo mineral sensiblemente distintos en las mezclas con uno y otro árido, consecuencia de haberse dosificado en peso en vez de en volumen. Respecto a la resistencia a la fisuración por fatiga en las mezclas tipo AC16S, las diferencias entre la mezcla con escoria GSW y con árido siliceo podrían ser debidas también a las diferentes proporciones de polvo mineral, que dan lugar a una rigidez distinta en cada mezcla.

Las mezclas con escorias poseen unas características y propiedades que cumplen perfectamente los valores del PG-3.

3. NEUMÁTICOS FUERA DE USO (NFU)

El polvo de caucho procedente de NFU es un sólido negro granulado, insoluble en agua, con buenas propiedades elásticas y de tenacidad. Está constituido por un porcentaje comprendido entre un 40-60% de caucho sintético, un 20-40 % de negro de carbono y entre un 10-45% de caucho natural. Su densidad aparente en tolueno está en torno a 410-450 mg/cm3 (densidad real de aproximadamente 1.1 g/cm3, frente a los aproximadamente 2.6 g/cm3 de los áridos naturales).

Se han ensayado un total de 7 muestras diferentes de caucho, cuya procedencia y características, así como la nomenclatura que emplearemos para designarlas de ahora en adelante, aparecen tabuladas a continuación. (Tabla 9)

La principal diferencia entre las distintas muestras radica en su granulometría.

Suministrador	Muestra	Origen	Clase	Pureza	Granulometría
RMD	C1	micronizado	P-3	Limpio de metales, tejidos (<0.1%) e impurezas	0-0.6mm
	C2	final de línea	P-2	Limpio de metales, tejidos (<0.1%) e impurezas	0-1mm
	C3	mitad de línea	P-1	Limpio de metales, con ~ 1.0 % de impurezas textiles	0-2mm
	C6	Micronizado 2	P-2	Limpio de metales, tejidos (<0.1%) e impurezas	0-1mm
Campi Jové	C4	Caucho obtenido por trituración mecánica	P-2	Limpio de metales, tejidos e impurezas	0-1mm
	C5		P-3		0-0.5mm
IndugarbiNFU Biurrarena	C7		P-3	Limpio de metales, tejidos e impurezas	0-0.6

Tabla 9. Procedencia de las muestras de polvo de caucho estudiadas en este trabajo

Se plantea como objetivo evaluar diferentes tipos de polvo de caucho procedente de NFU, en la fabricación de mezclas asfálticas. Los diferentes tipos de polvo de caucho serán estudiados para su empleo tanto por vía seca, como por vía húmeda y vía mixta. En el caso de la vía mixta no obtuvimos mejores prestaciones que las mezclas fabricadas por cualquiera de las dos vías independientemente, e incluso en ocasiones, los resultados fueran peores (posiblemente debido a una saturación de la mezcla en caucho) nos ha hecho descartar, por el momento, esta tercera vía de empleo del caucho.

3.1 EMPLEO DE POLVO NFU POR VÍA SECA. MEZCLA ASFÁLTICA AC16 50/70 SURF-S.

Con la finalidad de evaluar cómo influye el tipo de polvo NFU empleado en sustitución parcial de los áridos de machaqueo (vía seca) en el comportamiento de las mezclas, se han fabricado diversas mezclas AC 16 surf 50/70 –S que incorporan las diversas muestras de polvo de caucho evaluadas.

El proceso de diseño de las mezclas es parecido al empleado para la obtención de las fórmulas de trabajo habituales de un aglomerado convencional. La incorporación del polvo de caucho a la mezcla se realiza directamente en el proceso de amasado, sobre los áridos en caliente, antes de incorporar el betún. En este caso es importante tener en cuenta la granulometría conjunta de áridos y polvo de neumáticos. Variamos el porcentaje de caucho empleado, sobre el total de la mezcla, entre un 0,5 y un 3%. Así mismo, se ha fabricado una mezcla sin incorporación de caucho, como base de comparación de los diferentes resultados obtenidos.

Para la fabricación de todas las mezclas se ha empleado un betún de penetración convencional del tipo B50/70, proporcionado por Repsol. Como áridos se emplearon los provenientes de la gravera que posee el Grupo Antolín en la localidad de Corcos del Valle.

Dado que para la mezcla AC-16 surf 50/70-S convencional, fabricada sin adición de caucho, el porcentaje óptimo de betún es del 5% sobre mezcla, será este el porcentaje de betún empleado en la fabricación del resto de mezclas que incorporen el polvo de caucho.

Mezcla	caucho	% caucho	Densidad (g/cm^3)	% huecos mezcla	% huecos áridos	deformación	estabilidad
AC-16-S	-	0	2.35	5.4	16.2	2.9	16.5
C1-VS1	C1 (RMD)	1	2.331	5.05	16.65	2.74	21.74
C1-VS2		2	2.337	4.69	16.12	2.70	17.33
C1-VS3		3	2.261	6.03	17.84	2.09	13.24
C2-VS1	C2 (RMD)	1	2.340	5.15	16.51	2.68	22.03
C2-VS2		2	2.316	5.39	16.80	2.66	18.60
C2-VS3		3	2.252	6.33	18.09	2.74	15.0
C3-VS1	C3 (RMD)	1	2.325	5.66	17.00	2.61	20.42
C3-VS2		2	2.311	5.73	17.02	2.58	21.15
C3-VS3		3	2.228	7.76	19.22	2.55	15.41
C4-VS0.5	C4 (Campi y Jové)	0.5	2.457	3.49	13.81	2.74	18.60
C4-VS1		1	2.355	4.98	15.63	2.57	18.36
C4-VS2		2	2.325	6.35	16.93	3.09	18.48
C4-VS3		3	2.214	8.84	19.68	3.15	7.42
C5-VS2		2	2.311	6.49	17.03	2.51	13.54
C5-VS3		3	2.235	8.34	18.85	2.40	11.9
C7-VS1	C7 (Biurrarena)	1	3.32	6.41	63.60	3.18	17.03
C7-VS2		2	2.66	7.41	59.81	2.55	17.49
C7-VS3		3	4.08	9.86	52.03	3.97	12.44

Tabla 10. Resultados obtenidos a partir del análisis de las probetas Marshall fabricadas con cada una de las mezclas AC16-S que incorporaban polvo de caucho

A modo de conclusión podemos afirmar que los resultados obtenidos en laboratorio indican que la adición del polvo de neumáticos fuera de uso por vía seca pueda introducirse en la formulación de mezclas para capa de rodadura, obteniéndose mezclas con unas propiedades iguales e incluso mejores que las de la mezcla de partida, sin caucho. En cualquier caso, se recomienda emplear polvos de caucho de tamaño no demasiado fino (parece más aconsejable utilizar cauchos P-2 que P-3) y no pasar de un contenido del caucho sobre mezcla superior al 2 %, a fin de evitar que el polvo de caucho interfiera con el filler a la hora de formar el mástico, que es el responsable de dar solidez a la mezcla.

Se ha realizado también el ensayo de sensibilidad al agua (resistencia conservada en ensayo a tracción indirecta tras inmersión), a fin de comprobar el efecto del agua sobre la cohesión de las mezclas que incorporan caucho por vía seca, una vez han sido compactadas. El ensayo se ha realizado sobre las mezclas fabricadas con el porcentaje óptimo de caucho por vía seca, esto es el 1,5%.

Mezcla	ITS_q	ITS_w	ITSR (%)
C1-VS1,5	2.092	2.042	97,6
C2-VS1,5	1.697	1.621	95,5
C3-VS1,5	1.754	1.617	92,2
C4-VS1,5	1.694	1.523	89,9
C7-VS1,5	1.494	1.333	89,3

Tabla 11. Valores obtenidos en el ensayo de Resistencia conservada a tracción indirecta tras inmersión al que se sometieron las mezclas fabricadas con caucho por vía seca

En el caso de la mezcla con caucho por vía seca, los valores de ITSR están entre el 89.3 y el 97,6%. Estos valores son excelentes, especialmente en el caso de la mezcla fabricada con los cauchos C1 y C2, y cumplen con creces lo exigido en la normativa (ITSR≥ 85%), superando incluso el obtenido para la mezcla convencional (93,3 %).

Se ha efectuado también el ensayo de rodadura, según las Normas EN 12697-22 y EN 12697-6, para una de las mezclas diseñadas, en concreto la fabricada a partir del caucho C3 al 1.5% en peso, por ser éste el que mejores resultados mecánicos ha presentado (relación deformación/estabilidad). En este caso se ha obtenido un valor de WTSaire = 0,207 mm para 1000 ciclos de carga. Este valor se encuentra por encima del indicado en la normativa para capas de rodadura tráficos T0 y zona cálida, que es de 0.07 mm. Además, el valor obtenido es peor que el que ha resultado para la mezcla AC-16 surf 50/70-S de referencia, para la que se obtiene WTSaire = 0,104 mm.

3.2 EMPLEO DE POLVO NFU POR VÍA HÚMEDA

Como sucede con otros aditivos, el caucho puede incorporarse en los materiales asfálticos mediante la vía húmeda, es decir, modificando el betún asfáltico con el caucho, como si se tratase de cualquier otro polímero. El betún modificado con caucho (en adelante betún-caucho), puede emplearse en riegos, fabricación de mezclas asfálticas, etc.

El objetivo de esta parte del trabajo es evaluar cómo influye el tipo de polvo NFU empleado en la fabricación del betún caucho en las propiedades de este, así como en las de las mezclas finales en las que va a ser empleado como ligante. Con esta finalidad, se han fabricado diversos ligantes, a partir de un betún de penetración convencional del tipo B50/70, proporcionado por Repsol, al que se ha adicionado los diferentes tipos de caucho estudiados en proporciones comprendidas entre el 13 y el 16%. Los ligantes que mejores propiedades han presentado se han empleado para el diseño y fabricación de la mezcla AC16 Surf 50/70-S

Denominación betún-caucho	Betún partida	Caucho	Porcentaje	Penetración (dmm)	Anillo y bola (ºC)	Retorno (%)
-	Repsol 60/70	-	0	63	48.5	-
BC1-13		C1	13 %	41	62	23
BC2-13		C2		44	56	21
BC3-13		C3		45	58	20
BC4-13		C4		40	59	23
BC5-13		C5		35	64.5	26
BC6-13		C6		45	55	22
BC7-13		C7		41	59	44
BC1-16		C1	16 %	34	68.5	35
BC2-16		C2		37	61	33
BC3-16		C3		38	60.5	37
BC4-16		C4		33	62.5	43
BC5-16		C5		32	69.5	47
BC6-16		C6		43	59	23
BC7-16		C7		40	61	45

Tabla 12. Características de los diferentes betunes-caucho sintetizados

Se aprecia que se comportan mejor las mezclas fabricadas con betún-caucho al 13% que al 16%, independientemente de la muestra de caucho que se emplee. El empleo de caucho hace que las mezclas tengan valores del coeficiente Marshall hasta cuatro puntos superiores que los obtenidos para la mezcla fabricada con betún convencional. Estos resultados (Tabla 13) nos indican que el empleo de betún-caucho, independientemente del tamaño del caucho de partida (siempre que este se encuentre por debajo de 2mm) mejora el comportamiento mecánico de las mezclas.

Mezcla AC-16-S	Densidad (g/cm^3)	% Huecos mezcla	% Huecos áridos	Estabilidad (kN)	Deformación (mm)	Cociente Marshall (E/D)	ITSR
Referencia (60/70)	2.35	5.4	16.3	16.5	2.9	5.7	93.8
BC1-13	2.33	6.12	17.3	22.7	2.9	7.8	92.6
BC2-13	2.31	6.88	18.0	21.4	2.9	7.4	70.4
BC3-13	2.32	6.42	17.6	25.0	2.8	8.9	91.4
BC4-13	2.34	5.70	17.0	20.7	2.9	7.1	86.9
BC5-13	2.35	5.52	16.8	24.4	2.7	9.0	93.8
BC6-13	2.34	5.64	16.9	25.8	2.7	9.6	81.4
BC7-13	2.30	7.21	18.3	18.4	2.7	6.8	97.3
BC1-16	2.33	6.58	17.6	23.3	2.7	8.6	76.8
BC2-16	2.27	8.60	19.4	19.2	2.7	7.1	98.2
BC3-16	2.27	8.75	19.5	19.1	2.4	8.0	76.4
BC4-16	2.30	7.37	18.3	22.6	2.9	7.8	97.9
BC5-16	2.37	4.55	15.8	22.8	3.0	7.6	99.5
BC6-16	2.29	7.87	18.8	17.1	3.4	5.0	74.3
BC7-16	2.29	7.89	18.8	16.0	3.5	4.6	73.7

Tabla 13.Resultados de los ensayos de la mezcla AC-16 suf 50/70-S con NFU por vía húmeda al 13 y 16 %

Se ha efectuado también el ensayo de rodadura, según las Normas EN 12697-22 y EN 12697-6, para una de las mezclas diseñadas, en concreto la fabricada a partir del BC4 al 13%. En este caso se ha obtenido un valor de WTSaire = 0,011 mm para 1000 ciclos de carga. Este valor cumple perfectamente con la normativa, que indica un valor límite para este ensayo, en el caso de mezclas para capa de rodadura, tráficos T0 y zona cálida, de 0,07 mm. Además, el valor obtenido es mucho mejor que el que ha resultado para la mezcla AC-16 surf 50/70-S de referencia, para la que WTSaire = 0,104 mm, por lo que sólo podrían emplearse en tráfico T3 y arcenes.

3.3 INFLUENCIA DE LA ADICIÓN DE POLVO NFU EN DIFERENTES PROPORCIONES Y MEDIANTE DIFERENTES MECANISMOS (VÍA SECA, VÍA HÚMEDA Y MIXTA) EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS

Se han realizado análisis con diferentes porcentajes de polvo de caucho NFU, adicionado a la mezcla por diversas vías, este estudio se ha realizado en el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña, con la finalidad de determinar con mayor detalle las propiedades mecánicas de las diferentes mezclas mediante ensayos mecánicos en laboratorio (ensayo de tracción indirecta y ensayo de determinación del módulo de rigidez a tracción indirecta y Fénix). En concreto, se ha empleado el caucho C3 por tres vías diferentes: vía seca, vía húmeda y vía mixta.

A modo de resumen podemos decir que:

- Para todas las mezclas que incorporen caucho, sea cual sea la vía de mezcla, la densidad disminuye

- Cuando el método de incorporación del caucho a la mezcla es la vía seca, el porcentaje en huecos de la mezcla disminuye

- Cualquier probeta a la que se le haya añadido caucho independientemente de la vía o de la proporción, la estabilidad de las mismas aumenta

- Las probetas que incorporan un 13% de caucho por vía húmeda en la mezcla son las que tienen mayor resistencia a la tracción en seco y las probetas que llevan un 1,5% de caucho por vía seca son las que menos resistencia a la tracción presentan

- Para la mezcla betún-caucho al 16% es el valor obtenido de módulo de rigidez más alto

- En relación con los resultados obtenidos mediante el ensayo Fénix podemos hacer las siguientes observaciones: la adición de polvo de neumáticos fuera de uso a la mezcla bituminosa provoca un aumento en la rigidez de la misma, esta rigidez no provoca un aumento de la resistencia a la rotura, se puede apreciar un pequeño aumento de la resistencia en la mezcla obtenida por la vía mixta, aunque no es lo suficientemente grande como para tenerlo en cuenta. De todas las mezclas ensayadas la que mayor resistencia presenta es la preparada por vía húmeda con un 16% de polvo de caucho. En cuanto a las tensiones, la máxima es la presentada por la mezcla fabricada por vía húmeda con un 16% de polvo de neumático que coincide con las muestras que más resistencia tenían.

- Los valores IRT son similares para los diferentes tipos de mezclas por lo que en este parámetro no vemos que influyan ninguna de las dos variables.

En cuanto a los valores de energía de fractura obtenidos para las diferentes probetas se puede observar un valor máximo muy por encima de los demás para la mezcla fabricada por vía húmeda usando un 13% de polvo de neumáticos, la energía que requiere este tipo de muestra es mucho mayor que cualquier otra al

igual que ocurre con el índice de tenacidad, esto se debe a que este tipo de mezcla es la que menos resistencia ofrece.

Se han estudiado las propiedades mecánicas (densidad, resistencia, módulo, energía de fractura, etc.) de mezclas fabricadas con ligantes con polvo de neumático y a la vez determinar cómo influyen diferentes granulometrías a éstas. Este estudio se ha realizado en el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña

Para la realización del estudio se han empelado mezclas AC-16-S y AC22-S fabricadas con ligante con polvo de neumático (vía húmeda). El contenido y tipo ligante y la cantidad de polvo de neumático añadidos fueron iguales para ambas mezclas.

De los resultados obtenidos en el estudio realizado se derivan las siguientes conclusiones:

- Las densidades y resistencias a tracción indirecta de las dos mezclas ensayadas con granulometrías AC-16-S y AC22-S fueron muy similares entre ellas y a la vez estuvieron dentro del rango de valores esperados para este tipo de mezclas fabricadas con ligantes convencionales de penetración 60/70.

- Así mismo, los módulos de rigidez de ambas mezclas, AC-16-S y AC22-S, fueron muy similares y superiores a los esperados para mezclas convencionales de similares características fabricadas con ligantes sin polvo de neumático.

- Los resultados obtenidos en los ensayos Fénix muestran resultados ligeramente mejores para la mezcla AC-16-S, aunque la cantidad de datos muestrales no es suficiente como para extraer conclusiones definitivas al respecto.

- En comparación con mezclas convencionales del mismo tipo fabricadas con ligantes de penetración 60/70, los ensayos Fénix muestran una mayor rigidez de las mezclas fabricadas con betún caucho como muestra el hecho de que se sitúen cerca del límite superior en la resistencia a tracción (RT) y del límite inferior en la energía de fractura (GF).

- En definitiva, los resultados indican que las mezclas con betún caucho muestran densidades similares pero rigideces superiores a las mezclas convencionales del mismo tipo fabricadas con ligantes de penetración 60/70.

El propósito de estos estudios es la implementación de los resultados a escala real. De este modo se ha podido verificar la viabilidad del los subproductos seleccionados (NFU) para la realización de un tramo de prueba y validar las tecnologías utilizadas para la fabricación de estas mezclas bituminosas. Los ensayos de validación permiten una evaluación a nivel real de los costes de proceso unitarios y de sus beneficios medioambientales.

El tramo de ensayo realizado está situado en la A-6 del P.K. 122+000 al P.K. 156+000 tramo de Medina de Campo-Arévalo y del P.K. 260+000 al P.K. 264+500 (Variante de Benavente)

Las mezclas que se han empleado son:

- AC-22 Base BC35/50 S con BC fabricado IN SITU. (Collosa). 498,30 t en base de reposición de fresado (7cm de espesor)
    - PK.122+000- PK.156+000.
- AC-16 BIN BC 35/50 S con BC fabricado IN SITU. (Collosa). 33243,30 t, en capa intermedia de refuerzo (5cm)
    - PK 129+000- PK 122+000 calzada izquierda.
    - PK 122+000 al PK 128+000 carril derecho
    - PK 140+000 al PK 156+000 en calzada derecha.
- AC 22 Base BC 35/50 en BC procedente de central (Repsol) 24296,52 t en capa de base en reposición de fresado (7cm de espesor)
    - PK 122+000-156+000
- AC-16 BIN BC 35/50 S con BC procedente de central (Repsol). 61373,78 t en capa intermedia de refuerzo (5 cm de espesor)
    - PK 129+000 al PK 156+000 calzada izquierda
    - PK 261+000 al PK 264+500 en calzada izquierda,
    - PK 128+000 al PK 140+000 calzada derecha
    - PK 261+000 al PK 264+500 en calzada derecha,
- BBTM11B con BMAVC-1 (Asfaltómeros). 4750,10 t, en capa de rodadura de refuerzo (5cm de espesor)
    - PK 132+000- PK 136+000 en calzada izquierda.

Se realizaron las fórmulas de trabajo de las mezclas en los laboratorios de Collosa, Repsol y la Universidad Politécnica de Madrid.

Durante toda la ejecución del la obra se han realizado controles tanto de los betunes (fabricados IN SITU Figura. 4 y los procedentes de central) como de las mezclas empleadas, en el laboratorio de Collosa.

Figura 4. Tanque de almacenamiento y mezclador de COLLOSA

Además de los ensayos normales de control diario; Penetración (UNE EN- 1426), Anillo y Bola (UNE EN-1427), Recuperación elástica (NLT- 329) y Viscosidad dinámica (135ºC y 170ºC) (UNE EN 13302). También se han realizado ensayos nada más fabricar (T=0), a la hora de fabricación (T=1), a las 2 horas (T=2), a las 6 horas (T=6) y a las 8 horas de la fabricación (T=8), en el betún fabricado IN SITU. Observándose que se consigue cumplir especificaciones nada más mezclar (T=0), a las dos horas del mezclado se observa una mejora de las propiedades tanto en la Penetración como en el Anillo y Bola y Retorno y a las 6 horas se produce una estabilización de los resultados

Se ha realizado una caracterización reológica y tecnológica de los ligantes con caucho. Este trabajo se ha llevado a cabo en el Laboratorio de Reología del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Huelva.

Consistente en los siguientes ensayos.

- Determinación de la viscosidad en estado estacionario (curvas de flujo).
- Determinación de las funciones viscoelásticas del ligante, a 60ºC (barrido de frecuencia).
- Rampa de temperatura, con una velocidad de calentamiento de 1ºC/min y una frecuencia de 10rad/s, desde 25 a 100ºC.
- Ensayo de estabilidad al almacenamiento de betunes asfálticos modificados en tubos desechables (NLT-328/91).
- Ensayo de fuerza-ductilidad, a 25ºC y 5 mm/s (ASTM D-113).

Las conclusiones a las que podemos llegar después de la realización de dichos ensayo son:

- Los ligantes estudiados presentan un comportamiento predominantemente viscoso, acentuándose este comportamiento a medida que aumenta la

temperatura, presentando el ligante BC 35/50Caucho (Collosa) valores más altos de la viscosidad a todas las temperaturas ensayadas.

- El mayor contenido en sólidos del ligante BC 35/50Caucho (Collosa) con respecto al ligante BC 35/50 (Repsol) es el responsable del mayor endurecimiento de la muestra, temperatura de reblandecimiento más alta y menor penetración, así como del aumento de la viscosidad en la región de baja velocidad de cizalla.

- Las muestras con mayor contenido en sólidos insolubles son más inestables al almacenamiento a baja temperatura, produciéndose una decantación de los insolubles en la parte inferior de los tubos de almacenamiento.

- El aumento en contenido de partículas sólidas reduce la ductilidad del ligante, si bien aumenta la fuerza necesaria para su estiramiento.

La ejecución de la obra se ha realizado sin ningún tipo de contratiempo, todas las mezclas se han extendido y compactado perfectamente.

Este tipo de mezclas con caucho empleadas en el tramo de prueba, tienen una serie de ventajas.

La adición del polvo de caucho a un betún o a una mezcla bituminosa tiene dos efectos principales. El polvo de caucho actúa como espesante, aumentando la viscosidad del ligante. En las mezclas bituminosas esto permite envolver los áridos con películas más gruesas de betún sin que se produzcan escurrimientos o exudaciones. La adición de caucho modifica la reología del betún de manera que aumenta la elasticidad y resistencia a temperaturas elevadas y disminuye la susceptibilidad térmica.

El efecto conjunto de estas modificaciones permite conseguir en las mezclas: Mejores resistencias a las rodadas que las mezclas que utilizan mezclas convencionales, por su elevada viscosidad, punto de reblandecimiento y resiliencia. Menor susceptibilidad a la temperatura de las mezclas bituminosas fabricadas con betún convencional. Mayor resistencia al agrietamiento, tanto por fatiga como por reflexión de las capas inferiores, que las mezclas fabricadas con betún convencional, debido a los elevados contenidos de ligante que permite esta técnica. Mayor resistencia al envejecimiento y a la oxidación de las mezclas convencionales, por el potencial de utilizar mayores dotaciones de ligante y por la presencia de los antioxidantes del caucho de neumáticos.

Estas mejoras en las mezclas con caucho consiguen una reducción de costes en mantenimiento y de interrupción de tráfico por reparaciones en el firme. Otra ventaja que se deriva del empleo de caucho es desde el punto de vista de la seguridad vial ya que se mantiene durante más tiempo el contraste con las marcas viales debido a que al introducir más betún, dura más el color negro de la superficie.

Las principales ventajas ambientales que se deriva del empleo de polvo de neumático en los materiales bituminosos son:

Se cumple el principio ambiental de jerarquía, reutilización y reciclado de los residuos, y se reduce el volumen de neumáticos fuera de uso destinados a recuperación energética. El empleo de residuos permite a su vez ahorros de recursos naturales.

Su empleo en mezclas bituminosas permite reducir el nivel sonoro de rodadura

4. INCORPORACIÓN DE SUBPRODUCTOS Y COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS EN LOS PROCESOS DE SECADO Y CALENTAMIENTO DE ÁRIDOS EN PLANTAS ASFÁLTICAS.

4.1 INTRODUCCIÓN

El proceso de calentamiento y secado de áridos es, dentro de las operaciones que se llevan a cabo en la planta asfáltica, el proceso que lleva asociada una mayor carga ambiental.

Esta carga ambiental tiene su origen en la obtención de los combustibles utilizados en el quemador (siendo los más comunes el fuel y el gas natural), en su transporte hasta planta y en los procesos de combustión de éstos durante la etapa de calentamiento y secado del árido.

En base a los cálculos realizados en el marco de proyecto FENIX, se ha estimado el porcentaje de responsabilidad de carga ambiental que el proceso de secado tiene en la etapa de fabricación de la mezcla bituminosa, utilizando la herramienta ambiental del Análisis del ciclo de vida (ACV) usando el Ecoindicador'99 como método de evaluación.

Contabilizando las operaciones que se llevan a cabo en planta, el proceso de secado es responsable del 78% de los daños a la salud humana, el 84% de los daños a la calidad del ecosistema y el 65% de los daños a los recursos, tal y como se aprecia en la figura 5

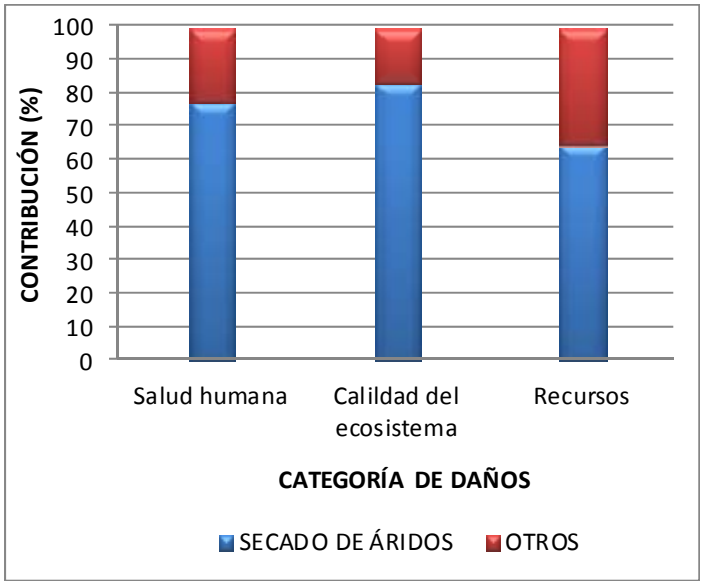


Figura 5 Contribución porcentual al daño provocado por el proceso de secado de áridos dentro de las operaciones en planta por categoría de daños

Una vez identificado el proceso de secado de áridos como el elemento que mayor impacto genera en planta, queda justificado invertir esfuerzos en intentar mejorar este proceso desde el punto de vista ambiental, para lo que se propuso una serie de combustibles alternativos y subproductos. Éstos fueron evaluados tanto en origen (proceso de fabricación, extracción, refinado, acondicionamiento), transporte hasta planta y emisiones derivadas del proceso de combustión.

4.2 SUBPRODUCTOS Y COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS ESTUDIADOS

Se decidió centrar el estudio en la búsqueda de combustibles líquidos, y en concreto dos subproductos (aceites usados y fueloil residual) y un combustible alternativo de origen no fósil (biodiesel):

- Aceites usados: Aceite industrial que se haya vuelto inadecuado para el uso que tenía asignado inicialmente. En particular se consideran como tales los aceites usados de motores de combustión, los de sistemas de transmisión, los de turbinas y sistemas hidráulicos, los de sectores de automoción, así como los de los sectores industriales procedentes de las actividades de la marina. Se hace necesaria la eliminación del agua y las partículas para que el aceite usado pueda ser utilizado como combustible alternativo en procesos industriales.

- Fueloil residual: Bajo la denominación de Marpoles se agrupan aquellos residuos compuestos por los lodos de fueloil, lodos de aceite, aceites quemados, derrames de fuel y gasoil, aguas de lavado de depuradoras, residuos de limpieza de tanques y sentinas. Estos residuos, con el correspondiente tratamiento, pueden ser utilizados como combustibles.

- Biodiesel: El biodiesel es un combustible de origen vegetal que puede reemplazar al gasoil mineral. Se presenta en estado líquido y se obtiene a partir de recursos renovables como aceites vegetales de soja, colza, girasol, palma y otros, como así también de grasas animales, a través de un proceso de transesterificación.

4.3 CARACTERIZACIÓN FÍSICO QUÍMICA

Con el fin de obtener información completa de los potenciales combustibles a incorporar a la planta, se realizaron una serie de ensayos físico-químicos. Entre ellos destacan:

4.4 COMPOSICIÓN ELEMENTAL

La determinación de los contenidos en C, H, N y S de las muestras de combustible se realizó mediante procedimiento interno de determinación de contenidos elementales con un equipo analizador elemental LECO. Para el contenido en cloruros se utilizó un equipo de valoración automática RADIOMETER. La determinación del contenido en oxígeno de la muestra de combustible se obtiene mediante el cálculo por diferencia a 100 de la suma de los diferentes elementos determinados más la parte inorgánica (tabla 14).

4.5 ANÁLISIS ENERGÉTICO

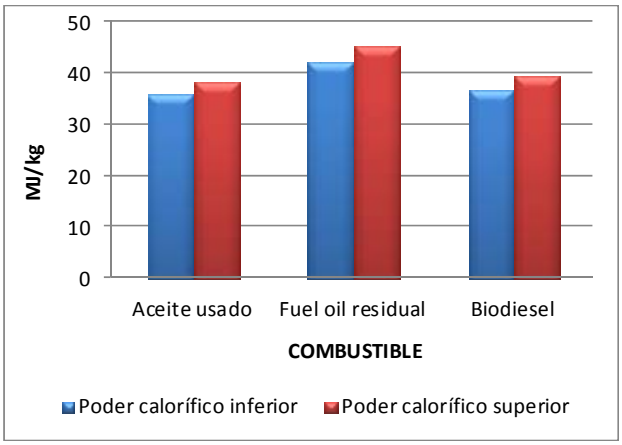


Figura 6. Poder calorífico de combustibles

El poder calorífico de las muestras de combustible se realizó siguiendo un procedimiento interno mediante un equipo calorimétrico, llevando a cabo la combustión del combustible en unas condiciones controladas de exceso de oxígeno (figura 6).

Este parámetro será fundamental en la potencial sustitución de combustible.

El Fueloil residual presenta el valor de PC más alto, seguido del Aceite usado y en último lugar el Biodiesel.

4.6 CURVA DE DESTILACIÓN

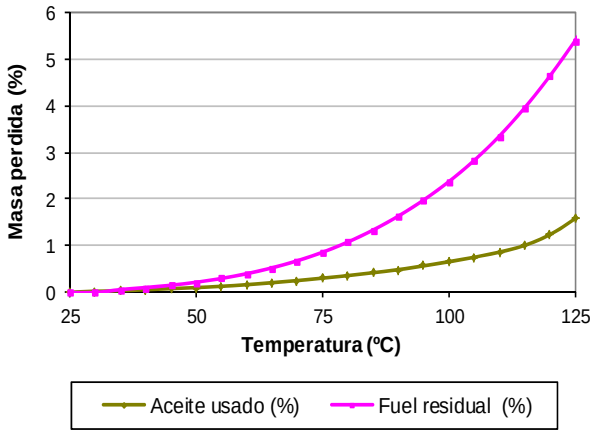
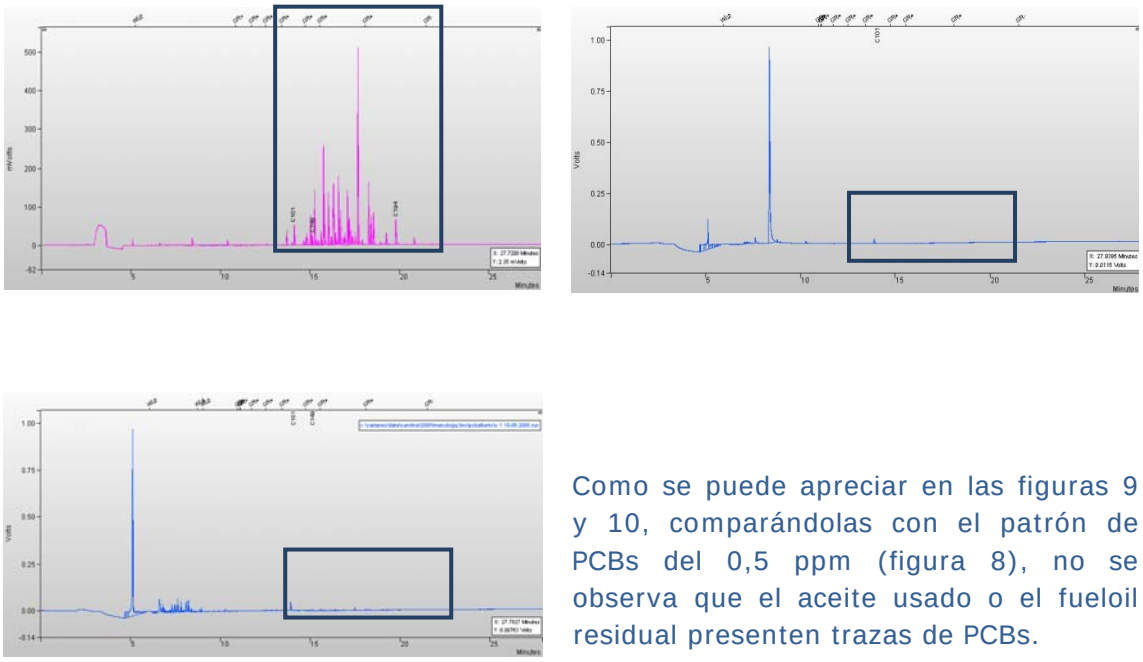


Figura 7. Curva de destilación de combustibles

Mediante la técnica de TGA (análisis termogravimétrico) es posible evaluar el comportamiento de una muestra en función de la variación de la temperatura (figura 7). Con el análisis de TGA se pudo observar el ratio de evaporación que experimenta el combustible alternativo en función de la temperatura a la que se le somete, ya que algunos fueles residuales presentan gran variedad de compuestos que pueden originar gradientes de evaporación no deseados.

4.7 DETERMINACIÓN DE PCBS

En el fueloil y en el aceite se realizaron ensayos de determinación de PCBs mediante proceso de limpieza empleando dos cartuchos de microextracción en fase sólida y posterior método cromatográfico.



Como se puede apreciar en las figuras 9 y 10, comparándolas con el patrón de PCBs del 0,5 ppm (figura 8), no se observa que el aceite usado o el fueloil residual presenten trazas de PCBs.

Figura 10. Fueloil residual

4.8 ENSAYOS DE COMBUSTIÓN

El objetivo de trabajar con la planta piloto de combustión es producir la reacción de combustión en cada muestra y analizar los gases de combustión que se producen. Para ello, el primer paso a la hora de llevar a cabo un ensayo es la carga del combustible seleccionado para la experimentación. La secuencia de pasos es análoga para los tres combustibles que se han estudiado. La cantidad de combustible establecida es cargada en el depósito del equipo, estableciendo los parámetros de temperatura de precalentamiento y agitación oportunos. Establecida la consigna, se deja que el equipo alcance el régimen estacionario en la temperatura fijada, vigilando la presión del depósito a través del manómetro (figura 11)

Figura 11. Planta piloto utilizada en el proyecto

Una vez alcanzada la temperatura a la que se quiere iniciar la combustión se conecta el PC que dispone del software de supervisión y adquisición de datos, basado en comunicaciones digitales. Desde el panel de control podemos monitorizar y modificar los valores de las variables.

Conectada ya la adquisición de datos, se arranca el equipo para llevar a cabo el proceso de combustión. El quemador es un dispositivo mecánico diseñado para producir una llama estable, con una forma y tamaño predeterminados, donde los combustibles líquidos se rompen en pequeñas gotas por medio de una boquilla de atomización.

Una vez que se inicie el proceso, se deja que el sistema vaya evolucionando, irá quemando el combustible y rechazando el sobrante. Durante este proceso se procede a la caracterización de los humos a través de la medida de datos in situ con un analizador de humos de combustión (Q-AH-002-00). Como se verá después en el apartado de resultados, este analizador de humos de combustión mide O2, CO, SO2 y NOx a través de célula electroquímica, CO2 a través de infrarrojos y temperatura de humos con termopar.

Se quiere hace constar aquí que para que se produjera la combustión del aceite y el fueloil en la planta piloto hubo que utilizar una fuente externa de energía, ya que el iniciador del equipo es una bujía. Ambos combustibles son difíciles de combustionar a través de bujía por lo que se decidió modificar el equipo de combustión e introducir un soplete adaptado que produjera la inflamación inicial (ver figura 12 y 13), continuando después el proceso normalmente.

Figuras 12 y 13. Iniciación, por fuente de energía externa, de la combustión del aceite y el fueloil

En la figura 14 se observa la evolución del proceso de combustión de los tres combustibles, monitorizado para las emisiones de CO, estableciéndose el inicio del régimen estacionario en torno a los 16 min para los tres combustibles.

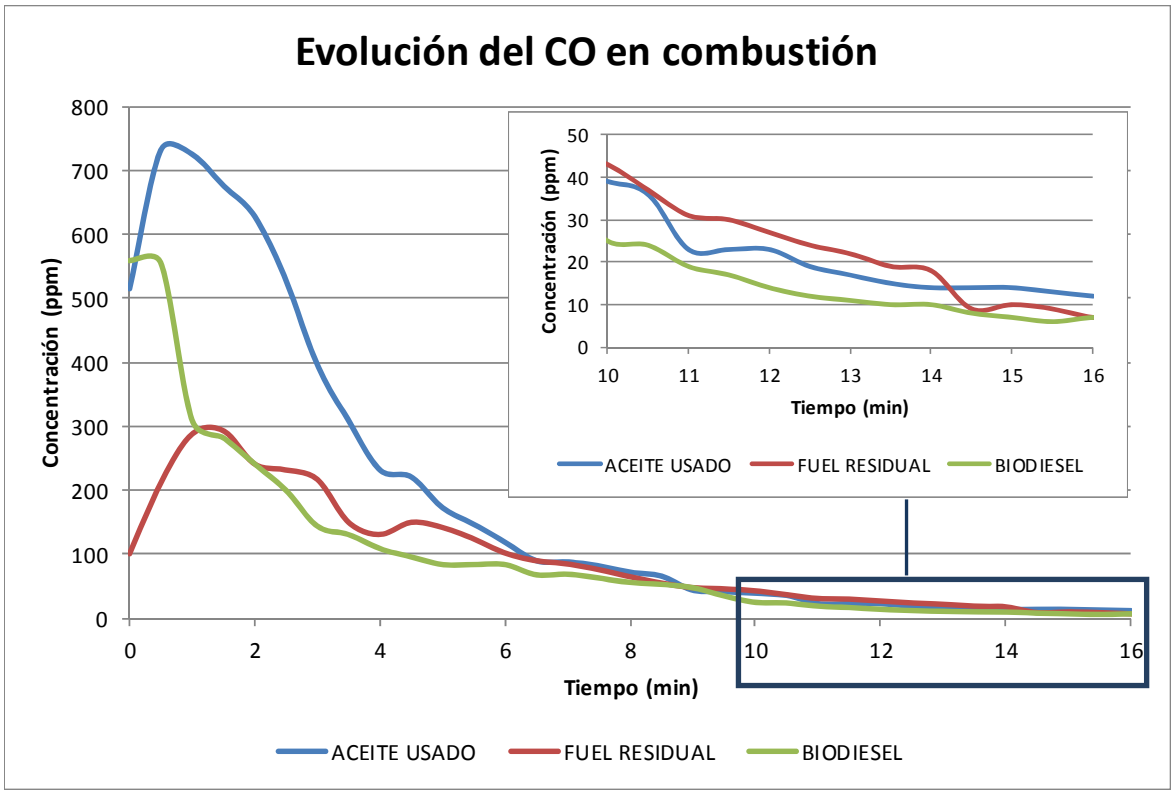


Figura 14. Monitorización de CO en combustión

Los resultados para las emisiones de CO2 y NOx se presentan en las figuras 15 y 16

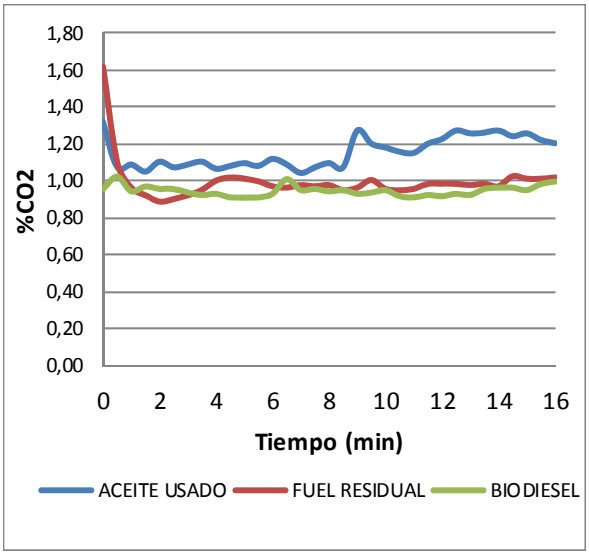


Figura 15. Emisiones de CO2

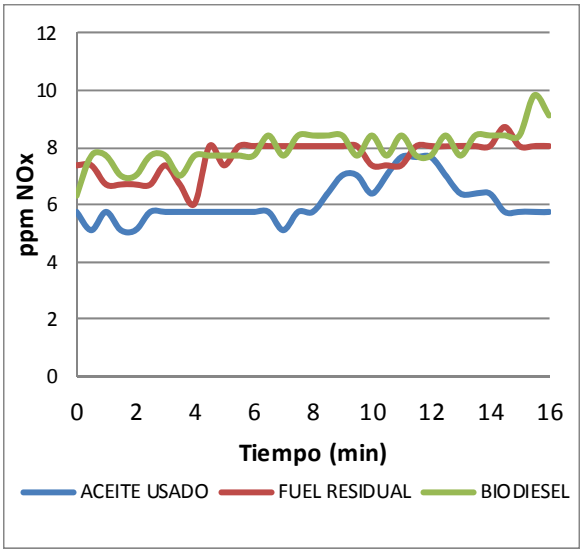


Figura 16 .Emisiones de NOx

La elección de un subproducto o combustible alternativo está condicionada por muchos factores, que dependen de la ubicación de la planta con respecto al origen del combustible, factores socio-económicos para asegurar su suministro continuo, etc.

Para concluir, el biodiesel presenta buenos resultados debido a su naturaleza no fósil, mientras que el aceite usado y el fuel residual ofrecen ventajas derivadas de otorgar un segundo ciclo de vida a potenciales residuos.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Escorias industriales como sustitutas de los áridos de machaqueo

- Aleajos, P., Sanchez de Juan, M., Sinis, F, Cano, H.. Catálogo de residuos utilizables en la construcción. Centro de Publicaciones de la Secretaría General Técnica del Ministerio de Medio Ambiente, 2002.
- Libro Blanco de Minimización de Residuos y Emisiones de Escorias de Acería. Sociedad Pública de Gestión Ambiental (IHOBE S.A.). Departamento de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente del Gobierno Vasco, 1999.
- Wu, S., Xue, Y., Ye, Q., Chen, Y.. Utilization of steel slag as aggregates for stone mastic asphalt (SMA) mixtures. Building and Environment, 42, 2580-2585, 2007

- Xue, Y. Wu, S., Hou, H., Zha, J. Experimental Investigation of Basic Oxygen Furnace Slag used as Aggregate in Asphalt Mixture. Journal of Hazardous Materials, B138, 261-268, 2006.

- Zelic, J. Properties of concrete pavements prepared with ferrochromium slag as concrete aggregate. Cement and Concrete Research, 35, 2340-2349, 2005.

Neumáticos fuera de uso como sustitutos de los áridos de machaqueo y como modificadores del betún asfáltico.

- Aleajos, P., Sanchez de Juan, M. Sinis, F., Cano, H. Catálogo de residuos utilizables en la construcción. Centro de Publicaciones de la Secretaría General Técnica del Ministerio de Medio Ambiente, 2002.

- Asphalt Rubber Usage Guide. California Department of Transportation (CALTRANS), 2003.

- Eldin, N., Senouci, A.B., Rubber – Tire particles as concrete aggregate. Journal of Material in Civil Engineering, 50, 4, 297-304, 1998.

- Páez, P. Bernardo de Quiros, R. Miró. Betún modificado con polvo de neumáticos. Actas del VI Congreso Nacional de Firmes. León, 2004.

- Payán de Tejada, F.J. Empleo de polvo de neumáticos fuera de uso en mezclas de carreteras. IX Jornada de Conservación de Carreteras. Salamanca, 2004.

- Plan Nacional de Neumáticos Fuera de Uso, 2000-2006. Ministerio del Medio Ambiente, 2000.

- Potti, J.J., Peña, J.L. Betún modificado con neumáticos fuera de uso. Un desarrollo eco-eficaz para las carreteras" IV Jornada Luso-Brasileñas de Pavimentos, Oporto, 2005.

- Ruiz Rubio. Utilización de neumáticos fuera de uso en mezclas bituminosas. Libro de Actas de la Jornada sobre Aplicación de Residuos en Carreteras, Barcelona, 2007.

- Witoszek, S.B., Hernández, O.F., Benito, M.C., Alonso, F.M. Diseño, desarrollo y seguimiento de un aglomerado asfáltico con polvo de caucho, procedente del reciclado de neumáticos usados, e incorporados por vía seca. I Jornada Técnica de ASEFMA sobre panorámica actual de las mezclas bituminosas. Madrid, 2005.

Combustibles alternativos en plantas asfálticas.

- BCN (2004) Contaminación por aguas de sentinas. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. Unidad de Apoyo al Proceso Legislativo. Valparaíso, Chile. Disponible en: www.navarro.cl/defensa/aguas/aguasentinas.doc (último acceso: marzo, 2008).

- CAR/PL (2006) Posibilidad de reciclaje y aprovechamiento de aceites usados. Centro de Actividad Regional para la Producción Limpia (CAR/PL), del Plan de Acción del Mediterráneo. Disponible en: www.cprac.org/pdf/triptics/olisusats/oliscast.pdf (último acceso: marzo, 2008).

- EC (2000) IUCLID Dataset. Fueloil, residual (Cas No. 68476-33-5). European Chemicals Bureau. Disponible en: ecb.jrc.it (último acceso: abril, 2008).

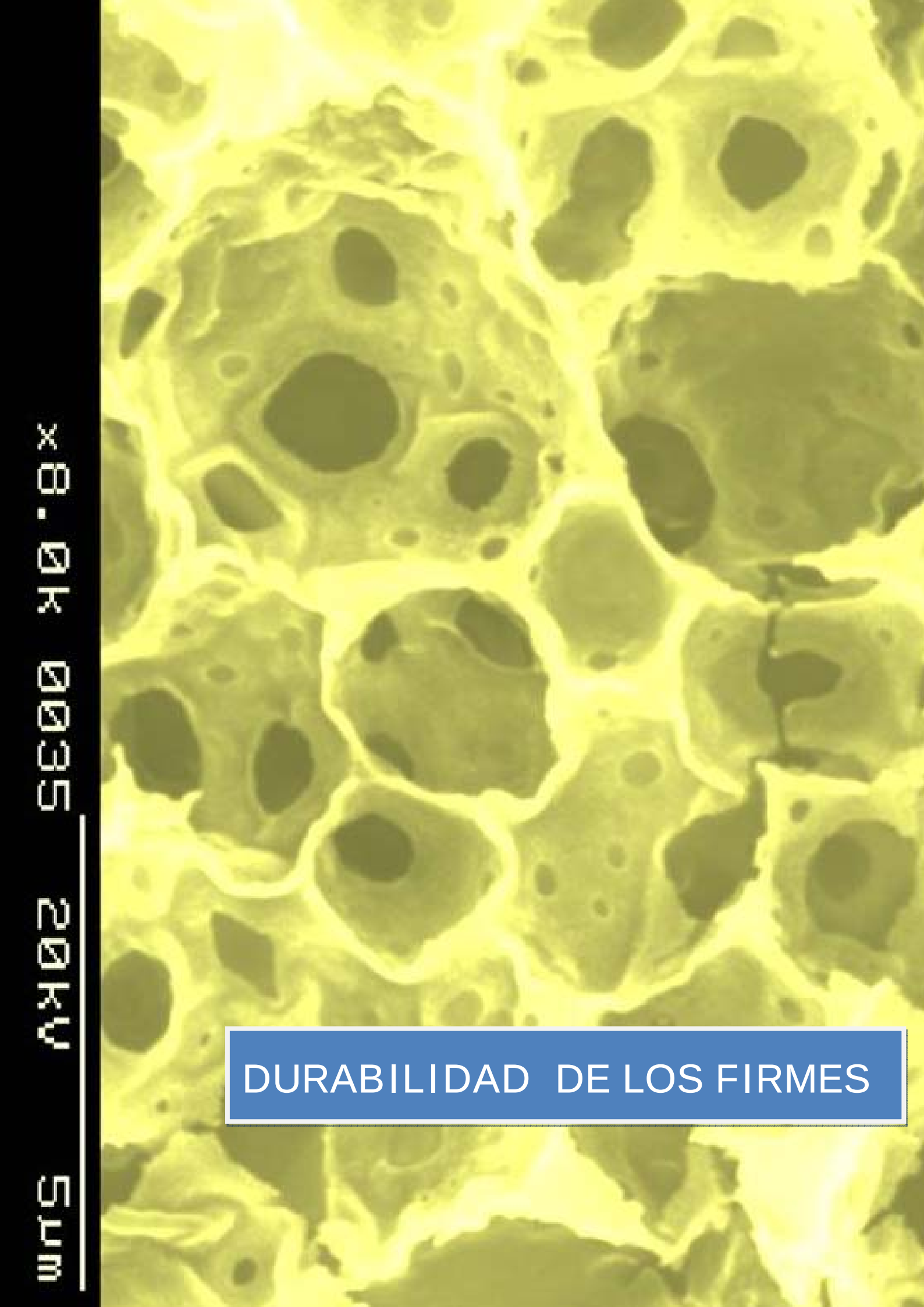
- Fuentes M.J., Font R., Gómez-Rico M.F., Martín-Gullón I. (2007) Pyrolysis and combustion of waste lubricant oil from diesel cars: Decomposition and pollutants. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 79, 215–226.

- Haas M.J., Bloomer S., Scott K. (2000) Simple, high-efficiency synthesis of fatty acid methyl esters from soapstock. Journal of the American Oil Chemists' Society, 77(4), 373-379.

- Lin Y., Greg Wu Y., Chang C. (2007) Combustion characteristics of waste-oil produced biodiesel/diesel fuel blends. Fuel, 86, 1772–1780.

- Shell (1999) Ficha de datos de seguridad. Combustibles: Fuelóleo pesado. Shell España, S.A. Disponible en: www.shell.com (último acceso: abril, 2008).

- US EPA (2002) A Comprehensive Analysis of Biodiesel Impacts on Exhaust Emissions. Draft Technical Report - Air and Radiation. United States Environmental Protection Agency. EPA420-P-02-001.



DURABILIDAD DE LOS FIRMES

MEJORAS EN EL COMPORTAMIENTO DE LOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS A PARTIR DEL CONTROL DE LA TEMPERATURA Y SEGREGACIONES TÉRMICAS EN SU EJECUCIÓN Y USO DE MEZCLAS ESPECIALES PARA EL FALLO POR FATIGA.

AUTORES

Miguel Martin Cano (Sacyr), Francisco Guisado Mateo (Sacyr), Jacinto Luis Garcia Santiago (Sacyr), Félix E. Pérez (UPC), Ramon Botella (UPC), Rodrigo Miró (UPC), Gonzalo Valdés (UPC).

1. INTRODUCCIÓN

Durante el diseño de una mezcla bituminosa destinada a ser parte de alguna de las capas que componen el pavimento se tienen en cuenta multitud de factores que afectaran a sus propiedades finales. Cabría esperar pues que el comportamiento del firme una vez ejecutado fuera totalmente predecible en función de las características de la mezcla obtenidas en laboratorio. Sin embargo, en la práctica se observa que la evolución del pavimento con el paso del tiempo con frecuencia no se ajusta a lo esperado. En ocasiones pavimentos diseñados para soportar un periodo de tiempo determinado presentan patologías mucho antes de que su tiempo de servicio se haya agotado, y a la inversa, pavimentos que superan su vida útil sin mostrar signos de desgaste importantes.

Una de las explicaciones más comunes para justificar estos fenómenos es la influencia del procedimiento de ejecución. Cuando se caracteriza una mezcla en laboratorio se presuponen unas condiciones de ejecución que no siempre pueden ser llevadas a cabo, ya sea por imposibilidades logísticas, inclemencias del tiempo o errores humanos, factores imprevisibles que no pueden ser tenidos en cuenta a la hora de diseñar la mezcla bituminosa.

Una de las principales hipótesis que se plantean a la hora de realizar ensayos de laboratorio para extrapolar las propiedades finales de la mezcla ejecutada en obra es la homogeneidad. Homogeneidad de la temperatura de fabricación, transporte,

extendido y compactación, así como homogeneidad de los materiales granulares que componen la mezcla. Garantizar todas estas homogeneidades supone una gran dificultad a nivel de obra. Se requiere un buen seguimiento de los acopios de material granular para evitar su segregación, una buena planificación logística que permita reducir al mínimo el tiempo de transporte de la mezcla para evitar pérdidas de temperatura excesivas, es recomendable emplear unidades transfer que homogeneícen la temperatura de la mezcla después de haber sido transportada, los compactadores deben estar bien coordinados para evitar que la mezcla se enfríe antes de haber sido compactada, y como éstas, otras actuaciones que se deben llevar a cabo con el mismo fin. Por ello, es fácil que una incidencia imprevista, por pequeña que sea, tenga una influencia importante en el comportamiento final de la mezcla.

En el desarrollo de la Tarea 6: Pavimentos de larga duración del Proyecto FENIX, uno de los temas estudiados más en profundidad ha sido la influencia de la temperatura de compactación en las propiedades mecánicas de las mezclas. Con el objetivo de evaluar la importancia de esta variable, los socios participantes en esta tarea fabricaron cerca de 1000 probetas Marshall variando granulometrías, tipos de ligante, tipos de áridos, contenidos de ligante, etc. Paralelamente, se extrajeron cerca de 200 testigos de pavimentos en los que previamente se registró la temperatura superficial de extendido mediante el uso de cámaras termográficas de infrarrojos. Todas estas probetas y testigos fueron sometidos a ensayos de caracterización mecánica con los que se pretendía determinar que propiedades de las mezclas se ven afectadas por la temperatura de compactación.

Estas alteraciones en la homogeneidad de la mezcla acaban repercutiendo negativamente en las propiedades mecánicas de ésta, y esto a su vez repercute en la durabilidad del pavimento. Por otra parte, una de las patologías más relacionadas con la durabilidad de los firmes bituminosos es su fisuración por fatiga ascendente. Las deformaciones que ocasionan repetidamente las cargas del tráfico en la capa de base producen la fisuración de ésta por fatiga, y estas fisuras se propagan irremediablemente hacia las capas superiores. En consecuencia, una de las propiedades mecánicas que más afecta a la durabilidad de un firme es la resistencia a fatiga de las mezclas bituminosas que lo componen, en especial las que se sitúan en las capas de base.

Siguiendo esta línea de investigación, en el marco de la Tarea 6, se estudió en profundidad la resistencia la fisuración ascendente por fatiga de la estructuras del firme. Para ello se caracterizó el comportamiento a fatiga mediante ensayos de laboratorio tanto de mezclas convencionales como de mezclas especialmente diseñadas para resistir la fisuración por fatiga. Adicionalmente se investigó sobre la existencia del límite de fatiga, deformación por debajo de la cual una mezcla bituminosa no debe experimentar fatiga. A continuación los datos obtenidos en los ensayos de fatiga se emplearon para realizar simulaciones con un modelo de cálculo estructural con el fin de determinar que sección estructural sería la más adecuada para implementar firmes resistentes a la fatiga y por lo tanto de larga duración. Las secciones estructurales más comunes fueron analizadas y se obtuvieron las vidas teóricas de cada una de ellas en función de los tipos de mezcla

que componían cada una de las capas. Por otro lado, se realizó un estudio sobre la influencia de las tensiones térmicas en la vida a fatiga de las mezclas bituminosas con el objetivo de alertar sobre el dominio limitado de validez de los modelos de cálculo que no tienen en cuenta estos factores. Por último se realizaron unas recomendaciones sobre secciones estructurales adecuadas para soportar largos periodos de tiempo de servicio teniendo en cuenta todos los resultados obtenidos a lo largo de todo el estudio.

2. CONTROL DE TEMPERATURA Y SEGREGACIONES TÉRMICAS

El trabajo realizado sobre el análisis de la temperatura de compactación en el comportamiento mecánico de las mezclas bituminosas se basó en dos estudios diferentes. En el primero se analizó el efecto de la temperatura de compactación sobre probetas de mezclas bituminosas fabricadas en laboratorio. El segundo estudio consistió en analizar las condiciones de compactación en obra (temperatura de compactación y segregaciones térmicas) y el efecto de estas condiciones de compactación en el comportamiento mecánico de la mezcla.

Para realizar la caracterización mecánica de probetas y testigos en laboratorio, se preparó una batería de ensayos, tales que permitieran obtener información sobre sus propiedades mecánicas. Las características que interesaba determinar fueron la cohesión, el módulo y la tenacidad, o resistencia a la fisuración. Para ello se emplearon los ensayos de tracción indirecta, módulo de rigidez y Fénix, respectivamente, éste último desarrollado a lo largo del Proyecto FENIX del cual lleva el nombre.

En particular, se escogió el ensayo de tracción indirecta porque reproduce el estado de tensión crítica bajo carga para una mezcla bituminosa. Además es un método rápido y sencillo para caracterizar las propiedades de dichas mezclas o evaluar el fallo de estas provocado por tensiones de tracción.

Por su parte, el ensayo de determinación del módulo rigidez a tracción indirecta (que sustituyó al ensayo de determinación del módulo resiliente) se consideró porque simula el comportamiento de la mezcla bituminosa bajo tráfico. Otra ventaja de este ensayo es que, además de ser sencillo y rápido, no es destructivo. Las probetas pueden emplearse una vez ensayadas en otros ensayos.

Finalmente se realizó el ensayo Fénix, Figura 1, el cual reproduce el principal modo de fallo por fisuración de las mezclas asfálticas cuando son sometidas a las solicitaciones ambientales y de tránsito. Mediante este ensayo se determina la tensión máxima a tracción, y propiedades como la energía de fractura para evaluar la resistencia a la fisuración de la mezcla bituminosa.

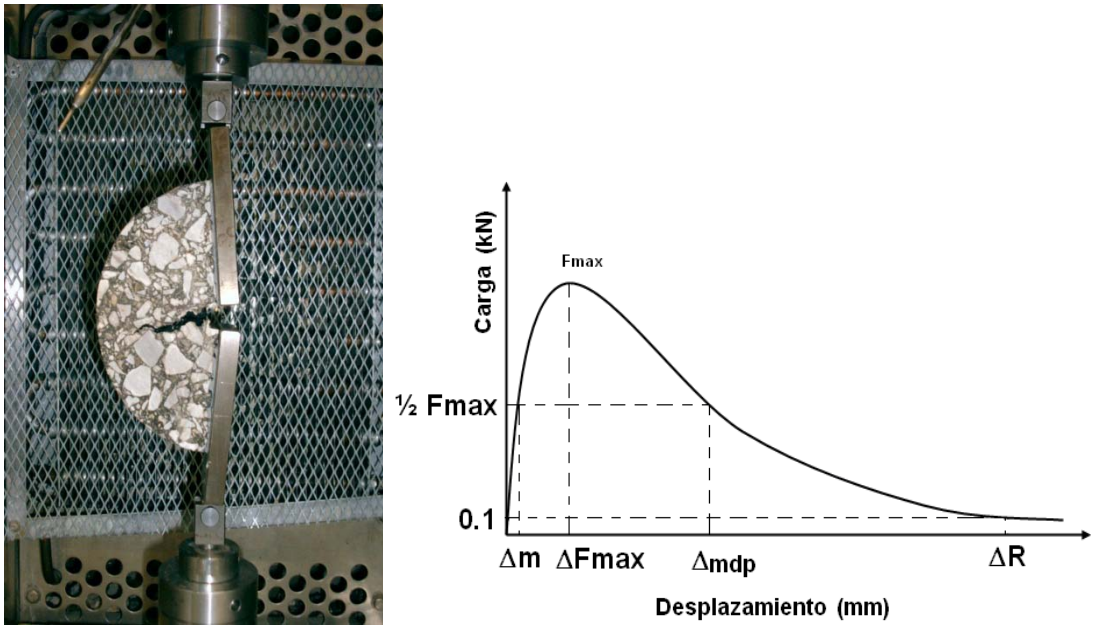


Figura 1. Configuración del ensayo Fénix y representación gráfica de los párametros más significativos que se obtienen a partir de la curva carga-desplazamiento.

3. EFECTO DE LA TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN

El trabajo realizado en el laboratorio abarcó una gran variedad de tipos de mezclas (densas, semidensas, gruesas y microaglomerados) fabricadas con diferentes tipos de betún (B60/70, B40/50, BM3a, y BM3c) y con áridos de procedencia también distinta. En total se ensayaron 21 tipos diferentes de mezclas cuyas probetas fueron fabricadas a tres temperaturas distintas (normalmente 120, 135 y 155ºC). El contenido de betún fue casi siempre de 4.5% de ligante sobre árido, aunque pudo variar en algunos casos teniendo en cuenta el tipo de mezcla y su óptimo de betún.

Los resultados de estos ensayos fueron analizados por tipo de mezcla y características mecánicas ensayadas. Se observó, en general, que el efecto de la temperatura tuvo mayor incidencia en las mezclas tipo denso o semidenso con un mayor contenido de finos y mástico. El descenso de la temperatura de compactación de 150 a 135ºC apenas mostró efecto cuando se emplearon betunes B60/70, pero en el caso de betunes más duros B40/50 o betunes modificados el efecto fue claro. El descenso de la temperatura de compactación de 150 a 120ºC tuvo efecto en todos los tipos de mezclas y en especial sobre las mezclas densas fabricadas con betunes de menor penetración, B40/50. La repercusión media que tuvo este descenso de la temperatura en las diferentes propiedades y tipos de mezcla fue el siguiente:

Tabla 1. Rangos de valores obtenidos para las probetas y los testigos ensayados.

				Ensayo Fénix a 20ºC	
Mezcla	Temperatura de compactación (ºC)	RTI (MPa)	Módulo de rigidez (MPa)	Tensión Máxima (MPa)	Energía de fractura (J/m3)
D-20	155ºC	2,9 -3,1	5800 - 6500	0,38 - 0,52	300 - 400
S-20	155ºC	2 - 3,3	3500 - 6000	0,28 - 0,42	400 - 500
S-20 (40/50)	160ºC	3,3	6200	0,40	610
S-12	155ºC	1,9 - 2,5	4000 - 6000	0,31 - 0,41	350 - 500
G-20	155ºC	1,9 - 2,1	4500	0,25 - 0,30	330 - 380
Testigos					
D-20		0,7 - 1,2	1400 - 1900	0,42 - 0,52	300 - 480
S-20 (40/50)		1,2 – 1,6	1600 – 2300	0,10 – 0,20	260 - 610
S-12					
G-20		0,9 - 1,3	1100 - 3400	0,05 - 0,21	100 - 480

- La resistencia a tracción indirecta media obtenida para una mezcla tipo denso y semidenso y betún B60/70 fabricada a 155ºC varió entre 2 y 3 MPa, disminuyendo ésta entre un 20 y un 25% al compactarla a 120ºC. Para mezclas tipo G-20 y betún B60/70 la resistencia de las probetas fabricadas a 155ºC fue ligeramente menor, entre 1.9 y 2.1 MPa y el descenso de esta propiedad al compactarla a 120ºC, también fue menor, del 10 al 20%.

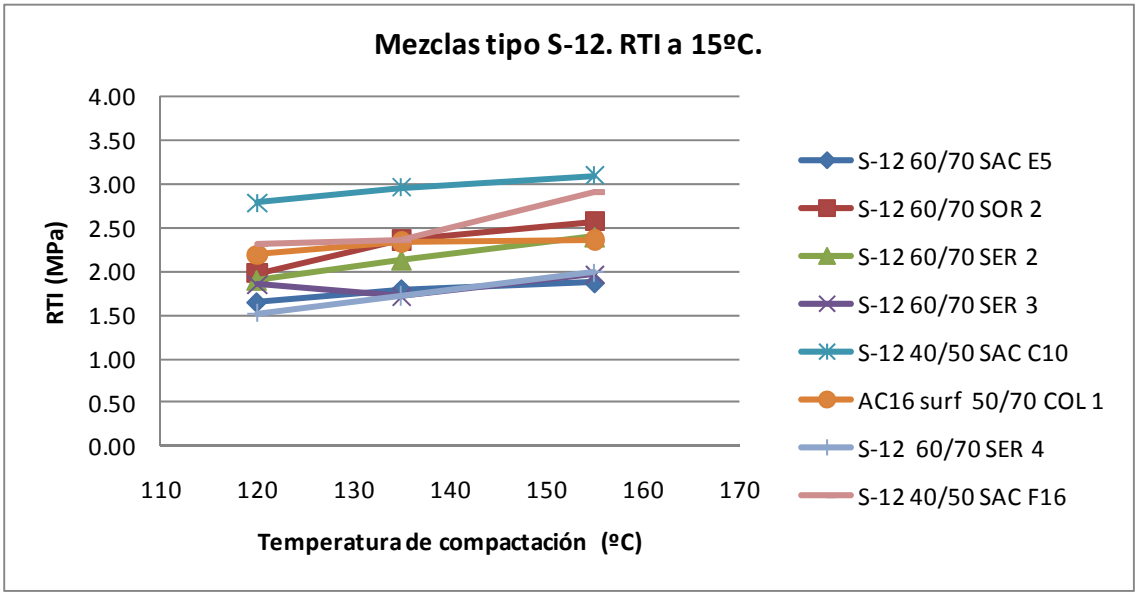


Figura 2. Resistencias a tracción indirecta promedio para mezclas tipo S-12.

- Los módulos de rigidez de las mezclas tipo denso y semidenso fabricadas con un betún B60/70 a 155ºC alcanzaron valores entre 5000 y 6500 MPa. El descenso de la temperatura de compactación a 120ºC supuso en algunos casos un descenso de hasta el 20 o 25%, llegando a un 35% en casos extremos. Las mezclas tipo G-20 con betunes B60/70 obtuvieron módulos inferiores a 4500 MPa, siendo también la pérdida por la menor temperatura de compactación entre un 8 y un 14% para el mismo decremento de la temperatura de compactación.

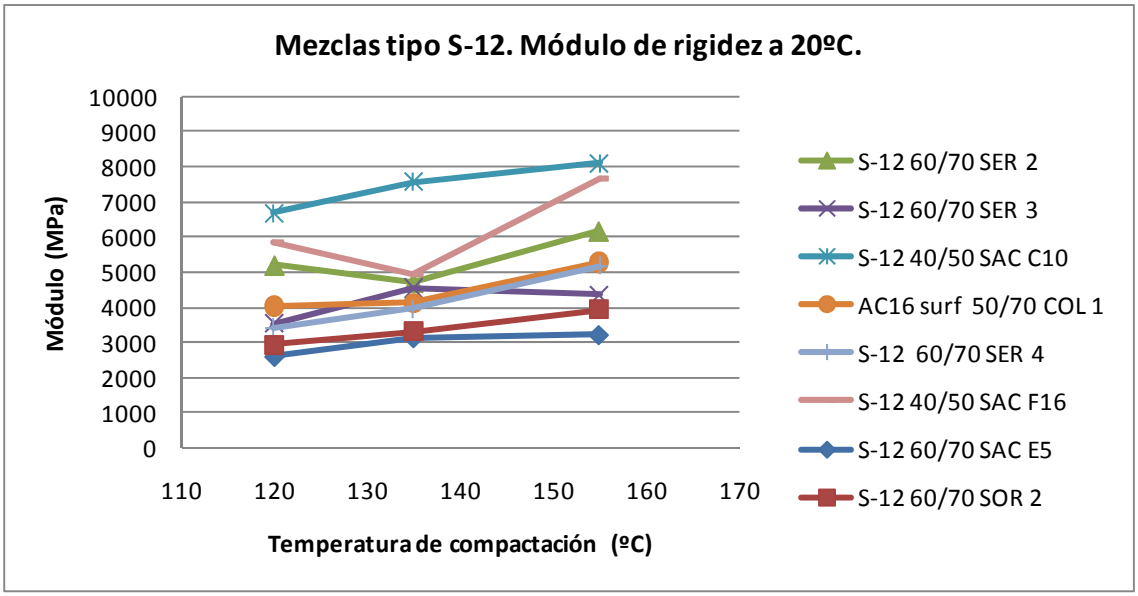


Figura 3. Módulos de rigidez promedio para mezclas tipo S-12.

- Las pérdidas de propiedades observadas en el ensayo Fénix (resistencia de rotura e Índice de Rigidez a Tracción) fueron similares, habiéndose encontrado una excelente relación entre estos parámetros determinados en el ensayo Fénix y la resistencia de rotura a tracción y módulo de rigidez obtenidos en el ensayo de tracción indirecta y el ensayo de módulo de rigidez.

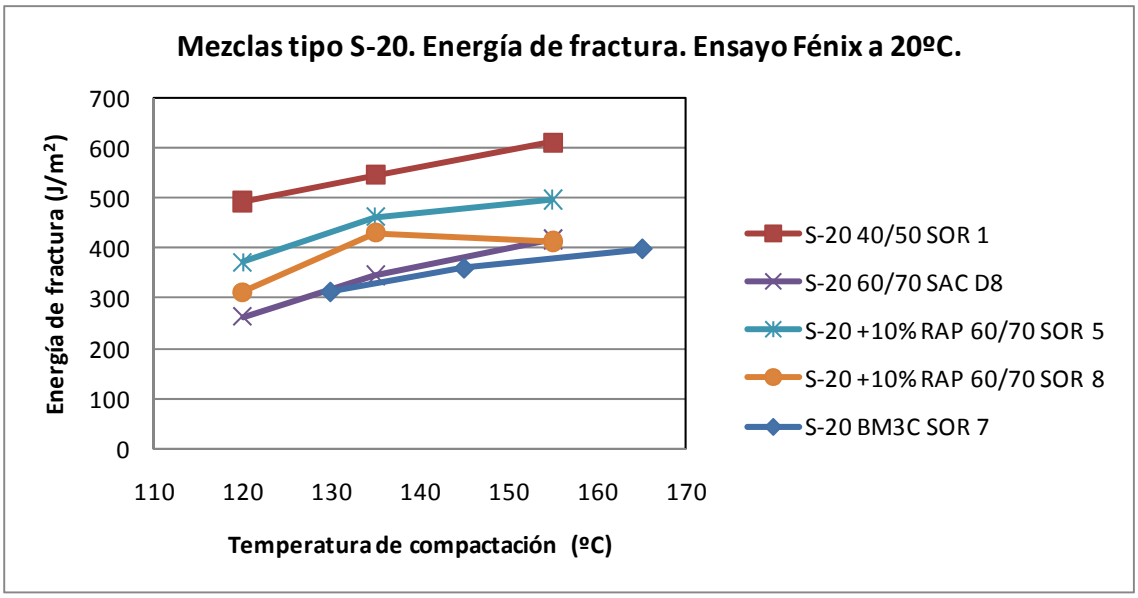


Figura 4. Energías de fractura promedio obtenidas en ensayos Fénix para mezclas tipo S-20.

4. TEMPERATURAS DE EXTENDIDO Y SEGREGACIONES TÉRMICAS

Del análisis de los resultados de las termografías tomadas en las cajas de los camiones antes del vertido de la mezcla en la extendedora, de las termografías obtenidas tras la salida de la mezcla de la regla de extendido y de los ensayos mecánicos llevados a cabo sobre probetas y testigos, se extrajeron las siguientes conclusiones:

La pérdida de temperatura que experimentó la mezcla durante su transporte no fue muy elevada. Se puedo estimar en los casos analizados entre 5ºC-15ºC, teniendo en cuenta la temperatura normal de fabricación de la mezcla (155ºC mezclas con B60/70 y 160ºC en B40/50) y la temperatura a la que llegó la mezcla al extendido.

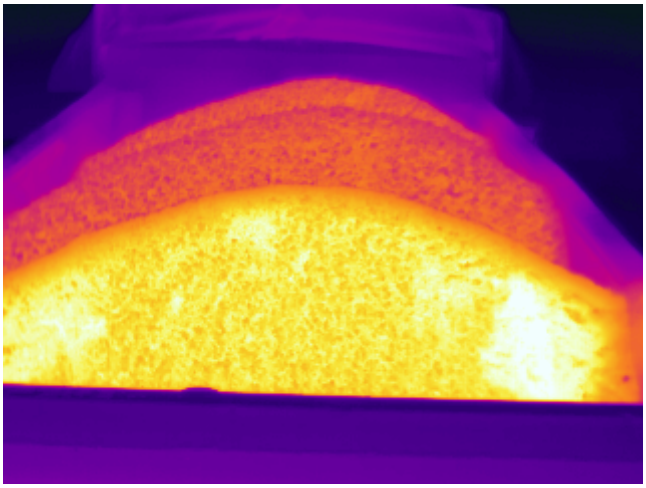


Figura 5. Termografía de la mezcla en la caja del camión.

No obstante hubo zonas locales dentro de la caja del camión, donde por efecto del viento o por estar la mezcla en contacto con superficies frías, se produjo un descenso importante de la temperatura. En estas zonas se midieron pérdidas en la temperatura de la mezcla de entre 25 y 95ºC.

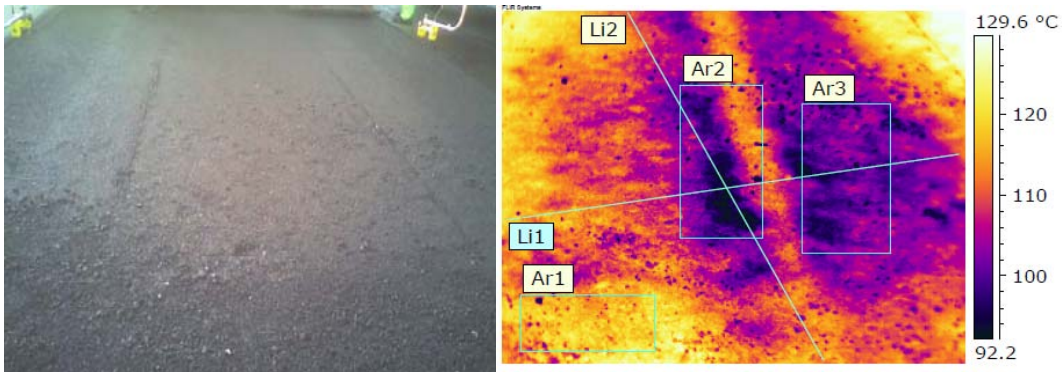


Figura 6. Fotografía y termografía de una zona de extendido que presentaba una segregación térmica.

El uso de un transfer móvil entre el camión y la extendedora resultó de gran utilidad para homogeneizar la temperatura de la mezcla antes de su vertido a la tolva de la extendedora.

Las temperaturas medidas en la superficie de la mezcla tras su extendido fueron entre 20 y 30ºC más bajas que la temperatura de la mezcla en el camión.

Hubo zonas dentro de la superficie de extendido que presentaron temperaturas entre 10 y 30ºC inferiores, zonas más frías en el extendido.

Esto pudo dar lugar a una diferencia entre la temperatura de la mezcla en el camión y la temperatura de la mezcla en la superficie de la capa extendida de entre 20 y 60ºc, y de 25 a 75ºC entre fabricación y extendido. En el caso de una mezcla con un betún 60/70 estas pérdidas representaron hasta el 50% de su temperatura de fabricación, Tabla 2.

Tabla 2. Pérdidas de temperatura relativas en las diferentes etapas del proceso de ejecución.

Mezcla	Temperatura superficial (ºC)			
	Δ (fabricación - camión)	Temperatura media de extendido	Δ (camión - extendido)	Δ (zonas frías y calientes)
G-20 60/70 SAC A7.1	15	107	33	20
G-20 60/70 SAC A7.2	0			
G-20 40/50 SAC C10	0			10
G-20 60/70 SOR 1				
S-20 40/50 SAC D11	15	112	33	11
G-25 60/70 SAC A12.1	5	130	20	30
D-20 60/70 SAC A12.2		108		

En el análisis de los datos proporcionados por las termografías habría que tener en cuenta que los datos fueron más representativos de la temperatura de la superficie de la capa extendida, que de la temperatura en el interior de la capa. No obstante, es importante remarcar que las termografías fueron muy útiles para señalar los fallos de homogeneidad de temperatura en la superficie de extendido y que una baja temperatura en la superficie puede ser también indicativo de una baja temperatura en el interior de la mezcla.

5. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE PROBETAS Y TESTIGOS.

La conclusión más remarcable del estudio realizado en la caracterización mecánica de probetas fabricadas en laboratorio y de testigos extraídos de obra, fue la gran diferencia de propiedades conseguidas en uno y otro caso para mezclas de similares características tipológicas. Estas diferencias fueron generalmente mayores en mezclas cerradas con mayor contenido de mástico que en las mezclas tipo gruesas, pero en todos los casos fueron considerables.

El módulo de las probetas de mezclas tipo D-20 y S-20, fabricadas con betunes 60/70, alcanzaron valores normalmente entre 5000 MPa y 6500 MPa mientras que

los testigos oscilaron entre 1500 MPa y 2000 MPa. Lo mismo ocurrió para su resistencia de rotura a tracción indirecta. Las probetas variaron entre 2 MPa y 3 MPa y los testigos lo hicieron entre 0.7 MPa y 1.2 MPa.

En el caso de las mezclas tipo G-20, fabricadas con betún 60/70, el módulo de las probetas fue de 4500 MPa y el de los testigos varío entre 1100 MPa y 3400 MPa. Por su parte, el rango de la resistencia de rotura a tracción indirecta de las probetas estuvo entre 1.9 MPa y 2.1 MPa y los testigos entre 0.9 MPa y 1.3 MPa.

La pérdida de las propiedades mecánicas de los testigos respecto a la de las mezclas fue en todos los casos mayor que la experimentada por las probetas en laboratorio cuando se rebajó la temperatura de compactación de 155 a 120ºC. Todo parece indicar que hay que prestar una mayor atención al proceso de compactación de la mezcla en obra, analizando todo el proceso de compactación tipo y velocidad de los equipos, número de pasada y también temperatura inicial y final de compactación.

Teniendo en cuenta al mismo tiempo los resultados de las termografías y de los ensayos mecánicos se deduce que con el fin conseguir que los testigos tengan propiedades similares a las de las probetas habría que disminuir la diferencia entre la temperatura de fabricación y de compactación en obra. Se debería exigir por tanto que las temperaturas de las termografías fuesen más uniformes y cercanas a las temperaturas de fabricación.

6. RECOMENDACIONES

De los estudios realizados en la Tarea 6.2 del Proyecto FENIX, una de las conclusiones principales es que la temperatura de compactación de la mezcla bituminosa juega un papel muy importante en las propiedades mecánicas de ésta.

Como se ha comentado anteriormente, unos de los principales problemas durante la ejecución es la pérdida de temperatura de la mezcla. Si el tiempo de transporte o el periodo entre extendido y compactación son demasiado largos las propiedades finales de la mezcla se ven afectadas gravemente. Por lo tanto es muy importante tratar de evitar aquellas situaciones que puedan favorecer una pérdida de temperatura excesiva.

En primer lugar es necesario garantizar un buen aislamiento de la mezcla durante su transporte en camión, así como un tiempo de transporte mínimo. Para ello se deben emplear lonas que cubran la carga y es preferible transportar masas elevadas, ya que estás conservan más el calor.

A continuación, es muy recomendable el uso de unidades transfer que rehomogenizan la temperatura de la mezcla después del periodo de transporte y antes de ser vertida en la extendedora, reintegrando en el volumen de la mezcla las costras frías que se forman en las partes exteriores en contacto con el aire.

La distancia entre extendedora y compactadores debe ser ajustada en función de las condiciones climatológicas de forma que estos puedan compactar la mezcla antes de que esta se enfríe en exceso.

En estas situaciones sería también conveniente realizar un seguimiento mediante cámaras termográficas de la temperatura superficial de la mezcla con objeto de detectar zonas segregadas térmicamente (costras frías).

SECCIONES ESTRUCTURALES RESISTENTES A LA FISURACIÓN ASCENDENTE POR FATIGA

AUTORES

Francisco Guisado Mateo (Sacyr), Patricia Diaz Martin (Sacyr), Jacinto Luis Garcia Santiago (Sacyr), Félix E. Pérez (UPC), Ramon Botella (UPC), Rodrigo Miró (UPC), Gonzalo Valdés (UPC).

1. INTRODUCCIÓN

Los estudios realizados, indicaron que la aplicación de las metodologías de diseño estructural tradicionales para firmes flexibles, basadas fundamentalmente en la determinación de la deformación unitaria por tracción crítica y la aplicación de modelos de fatiga obtenidos extrapolando las curvas correspondientes para un número de reiteraciones de la solicitación compatible con el período de diseño adoptado, presentaron serios inconvenientes para su aplicación directa a los pavimentos de larga duración.

En primer lugar, la combinación de módulos y curvas de fatiga extrapoladas para elevadas reiteraciones, llevó casi todos los casos a favorecer la inclusión de mezclas de muy alto módulo. Esto conduce entonces a una lógica recomendación – desde este punto de vista y a la luz de las herramientas disponibles para el diseño estructural – hacia las mezclas bituminosas de alto módulo. Esto es así aún para los climas o temperaturas más frías, circunstancia que llamó más la atención considerando que para estos casos las técnicas actuales recomiendan la utilización de betunes más blandos y mezclas más flexibles, justamente para prevenir uno de los deterioros no considerados en los métodos corrientes de cálculo estructural: la fisuración térmica. Esto llevó al análisis del comportamiento a fatiga utilizando un mayor número de aplicaciones de carga y determinación del Fatigue Endurance Limit (FEL). También se estudiaron y dosificaron mezclas especiales resistentes a la fatiga, tanto con betunes blandos como duros. Se analizó el comportamiento de los pavimentos asfálticos al introducir este tipo de mezclas y, por último, considerando también el efecto de las tensiones térmicas, se plantearon una serie de propuestas para el diseño de firmes de larga duración.

2. MEZCLAS RESISTENTES A LA FATIGA

Una de los objetivos del estudio ha sido el estudio y dosificación de mezclas resistentes a la fatiga con objeto de mejorar la respuesta de los firmes asfálticos ante este mecanismo de fallo. Para ello se partió del ensayo Fénix y se analizó el efecto del tipo de granulometría así como el tipo y contenido de betún sobre el módulo de la mezcla y su energía de fractura. Se buscó una granulometría con un mayor contenido de huecos en árido que pudieran ser rellenados por un buen mástico y se seleccionó así una mezcla de granulometría gruesa, situada en el límite inferior del huso granulométrico de las mezclas tipo G, pero con mayor contenido de filler. Con esta granulometría se utilizaron dos tipos de ligantes de diferente penetración, uno duro, B13/22, y otro más blando, B60/70, con objeto de obtener mezclas de diferente módulo y analizar su respuesta a la temperatura de 20ºC, que es la empleada normalmente para evaluar la respuesta de la mezcla a fatiga, y también a 5 y a 10ºC para ver la variación de su comportamiento a bajas temperaturas.

El ensayo Fénix muestra la gran influencia que tienen la temperatura, la penetración y el contenido de betún en el comportamiento a fisuración de las mezclas bituminosas. La mezcla fabricada con el betún blando, B60/70, presenta a la temperatura de 20ºC la mayor deformación de rotura, aunque es la que tiene también el menor módulo, Figura 7. Al bajar la temperatura disminuye la deformación de rotura, pero aumenta módulo y la energía de rotura. En el caso del betún B60/70 se observa que hay un máximo para la energía a la temperatura de 5ºC. La mezcla fabricada con el betún B13/22 tiene un comportamiento más frágil. A 20ºC es cuando presenta una mayor energía de rotura y esta va disminuyendo a medida que baja la temperatura, Figura 8.

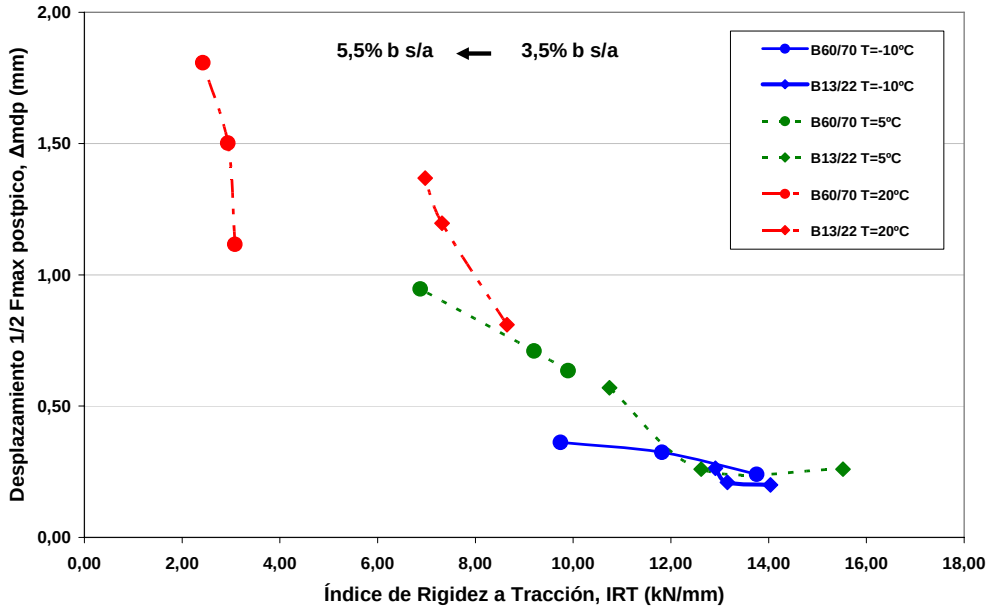


Figura 7. Efecto del tipo y contenido de betún sobre la relación IRT- Δmdp a diferentes temperaturas de ensayo.

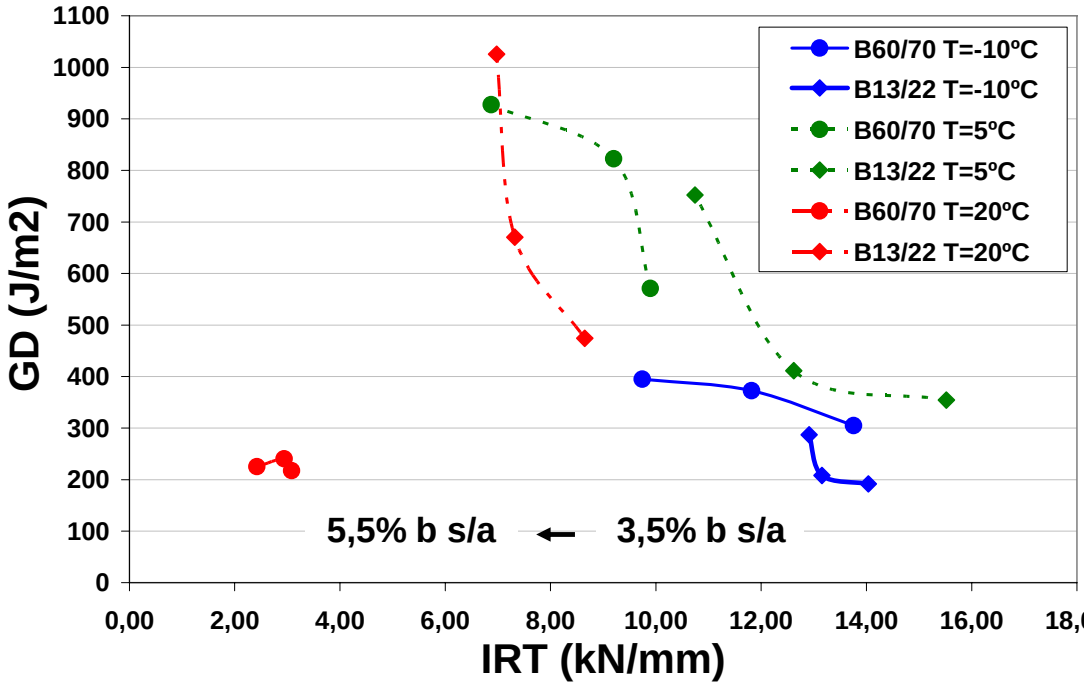


Figura 8. Energía de fractura en función del Índice de Rigidez a Tracción para diferentes contenidos de ligante.

En la Figura 8 se puede observar también el efecto del contenido de betún. La mejor respuesta se obtiene en todos los casos ensayados para el mayor contenido de betún, con independencia de la temperatura de ensayo o el tipo de betún empleado. También se observa que la respuesta de la mezcla fabricada con el betún 13/22 y ensayada a 20ºC tiene la misma respuesta que la mezcla fabricada con el betún B 60/70 y ensayada a 5ºC. Esto hace que ambas mezclas presenten los mismos resultados cuando se determinan sus leyes de fatiga a 5ºC y 20ºC. En la Figura 9, aparecen en la parte inferior las leyes de fatiga de la mezcla fabricada con el B 13/22 a 5º y 20ºC, y junto a ésta última, un poco más arriba, la ley de la mezcla fabricada con el betún B 60/70 y ensayada a 5ºC. La mezcla fabricada con este betún más blando y ensayada a 20ºC está situada más arriba y presenta un módulo mucho más bajo, 2409 MPa, frente a los 8750, 9293 y 18623 MPa obtenidos con las otras mezclas.

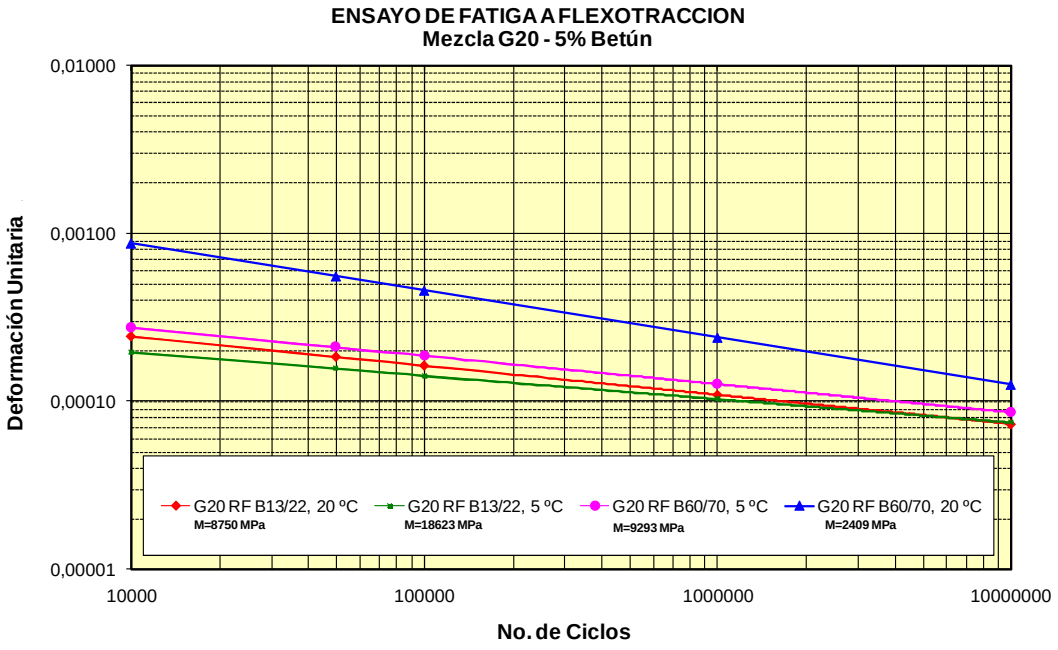


Figura 9. Leyes de fatiga mezcla G-20 diseñada para ser resistente a la fatiga a 10.000.000 de ciclos.

Estos resultados muestran la relación entre los resultados del ensayo Fénix y el ensayo de fatiga. Mediante la aplicación de ambos ensayos a distintos tipos de mezcla se ha obtenido la correlación entre los parámetros determinados en el ensayo Fénix (Índice de Rigidez a Tracción y deformación al 50% de la carga máxima post-pico) y los que gobiernan su comportamiento a fatiga (parámetros a y b de la ley de fatiga), ecuación 1.

$$\log N = a - b \log \varepsilon \qquad 1$$

La relación entre el parámetro a de la ley de fatiga (deformación en el ciclo 1 del ensayo a fatiga) y el desplazamiento cuando la carga alcanza la mitad del valor máximo en la zona post-pico, Δmdp, se muestra en la Figura 10. Se deduce de esta figura que a mayor desplazamiento obtenido en el ensayo Fénix, mayor deformación en la ley de fatiga, como lo muestran las mezclas con betunes de mayor penetración y ensayadas a mayor temperatura en el ensayo Fénix.

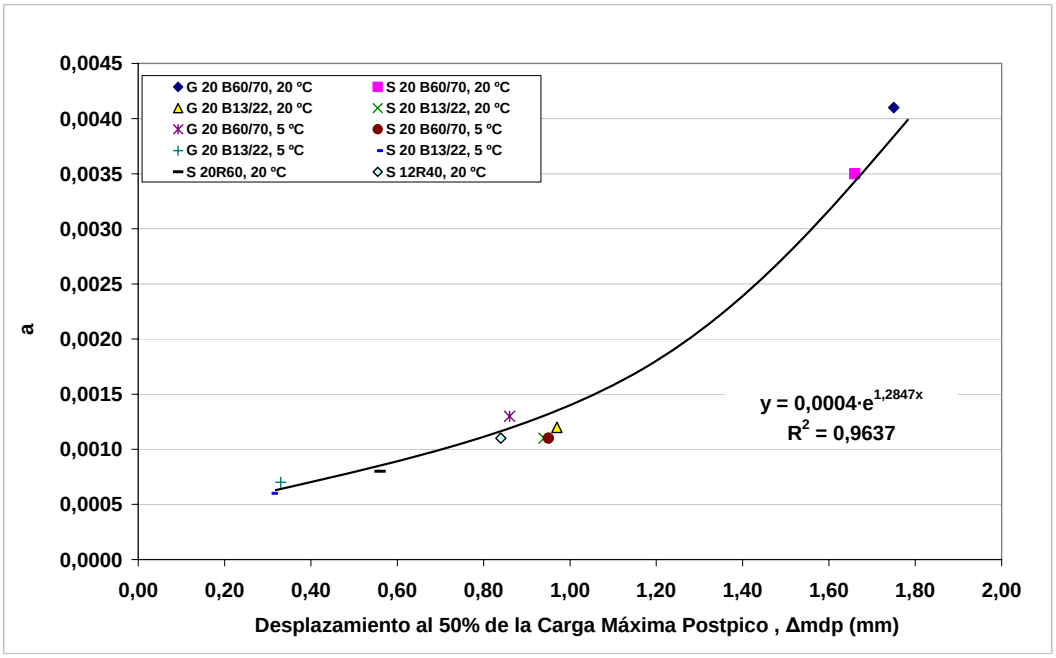


Figura 10. Correlación entre el parámetro a de la ley de fatiga y el parámetro desplazamiento al 50% de carga máxima post-pico del ensayo Fénix.

Por otro lado, en la Figura **11**, se presentan las correlaciones entre el Índice de Rigidez, IRT, y la pendiente b de la ley de fatiga. En este caso se puede comprobar que las mezclas con mayor rigidez en el ensayo Fénix presentan menor pendiente en la ley de fatiga, como es el caso de las mezcla con betunes más duros ensayadas a bajas temperatura en el ensayo Fénix.

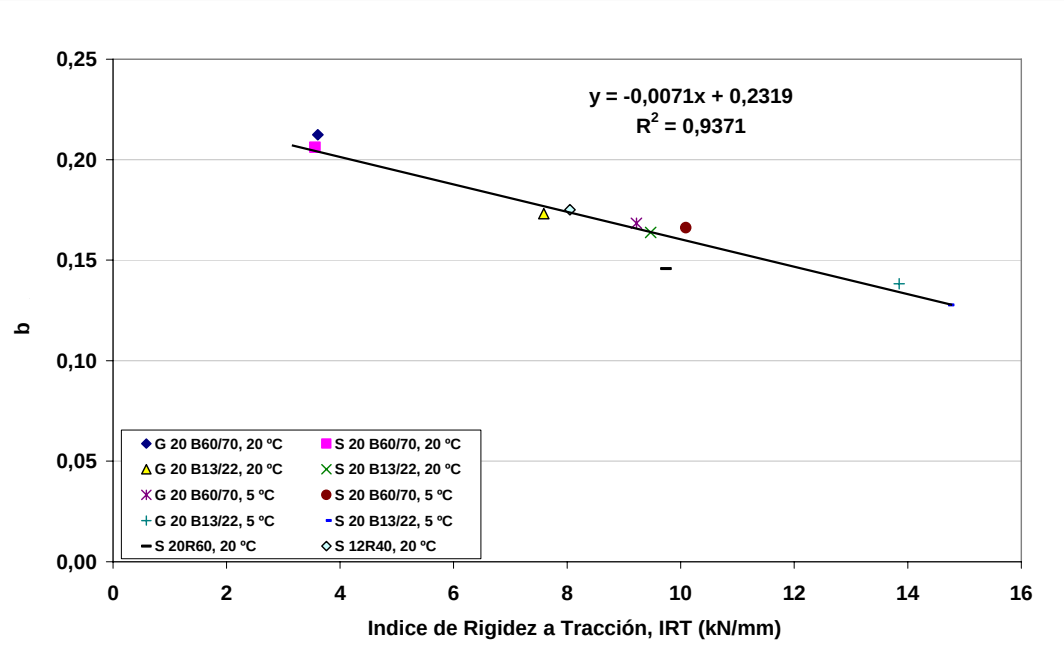


Figura 11. Correlación entre el parámetro b de la ley de fatiga y el parámetro Índice de Rigidez a Tracción del ensayo Fénix.

De este modo, a partir de los parámetros obtenidos del ensayo Fénix y mediante las correlaciones encontradas, es posible estimar la ley de fatiga de la mezcla bituminosa.

A modo de resumen, la Figura 12 muestra los resultados obtenidos a lo largo de este trabajo con todas las mezclas analizadas. Las mezclas presentadas anteriormente con una mejor respuesta a la fatiga son las que se encuentran en la parte superior de este gráfico. El ensayo Fénix puede ser un procedimiento sencillo para evaluar la resistencia a la fatiga de las mezclas bituminosas, ya que permite relacionar dentro de cada rango de rigidez aquellas que presentan una mayor energía de rotura y rechaza aquellas que presentan problemas de excesiva rigidez y baja energía de rotura (problemas de fragilidad)

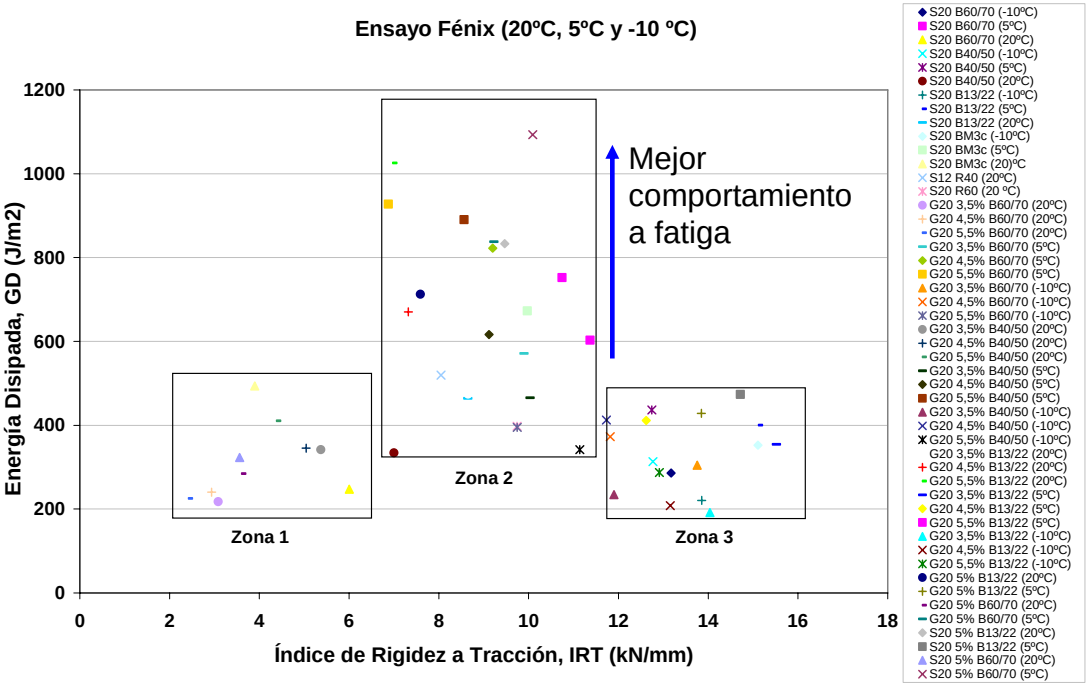


Figura 12. Clasificación de las mezclas en función de su energía de fractura y su Índice de Rigidez a Tracción.

3. COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL. EFECTO DE LA TEMPERATURA Y EL TIPO DE MEZCLA.

Las leyes de fatiga obtenidas anteriormente han sido aplicadas en el análisis de las dos tendencias aplicadas en el desarrollo de firmes asfálticos de larga duración, por una parte al uso de mezclas flexibles y tenaces resistentes a la fatiga, que se corresponden con la mezcla fabricada con el betún B60/70, y por otra parte, el caso de la mezcla de alto módulo con objeto de disminuir la deformación de solicitación de la mezcla y aumentar también de esta manera la vida de fatiga del firme, mezclas fabricadas con el betún B13/22.

Partiendo de las leyes de fatiga determinadas anteriormente se ha determinado el efecto del empleo de ambos tipos de mezclas en la vida de fatiga de un firme a 5 y 20ºC, al ir introduciendo en su construcción este tipo de mezclas en substitución de las mezclas convencionales, tipo S-20 y G-20 fabricadas con un betún B60/70. Los resultados de estos cálculos aparecen en la Tabla 3 y la Tabla 4, respectivamente.

Tabla 3. Resultados de los cálculos estructurales considerando leyes de fatiga obtenidas a 5ºC.

	A	B1	B2	C1	C2	D1	D2	D3	D4	E1	E2
S-20	7,92E+16	5,03E+16	1,43E+19	-	1,10E+16	-			1,20E+11	1,24E+09	
G-20	2,47E+08	8,12E+10	3,92E+13					1,01E+11			2,21E+08
MAM			1,17E+09	1,64E+09		4,69E+10	4,15E+10				
MRF		1,69E+08			1,62E+08	2,56E+08	2,95E+08	1,53E+08	2,05E+08		
ZA	2,26E+09	2,03E+09	3,95E+09	4,86E+09	1,98E+09	2,60E+09	2,84E+09	1,91E+09	2,28E+09	3,27E+09	2,10E+09
Expl.	2,69E+09	2,52E+09	4,35E+09	5,25E+09	2,52E+09	3,06E+09	3,51E+09	2,29E+09	2,77E+09	3,64E+09	2,36E+09
N_{adm}	**2,47E+08**	**1,69E+08**	**1,17E+09**	**1,64E+09**	**1,62E+08**	**2,56E+08**	**2,95E+08**	**1,53E+08**	**2,05E+08**	**1,24E+09**	**2,21E+08**
V_{REL}	**1,00**	**0,68**	**4,73**	**6,65**	**0,65**	**1,03**	**1,20**	**0,62**	**0,83**	**5,01**	**0,90**

Tabla 4. Resultados de los cálculos estructurales considerando leyes de fatiga obtenidas a 20ºC.

	A	B1	B2	C1	C2	D1	D2	D3	D4	E1	E2
S-20	6,44E+11	2,62E+11	3,77E+12	-	1,55E+09	-			9,87E+07	1,33E+07	
G-20	1,09E+07	8,13E+07	4,69E+11					7,69E+07			1,15E+07
MAM			1,61E+07	1,99E+07		4,79E+07	4,46E+07				
MRF		1,10E+07			9,69E+06	1,46E+07	1,91E+07	1,14E+07	1,03E+07		
ZA	3,01E+08	1,83E+08	6,13E+08	8,02E+08	1,60E+08	2,43E+08	3,23E+08	1,89E+08	1,71E+08	2,18E+08	3,13E+08
Expl.	4,43E+08	3,55E+08	6,41E+08	8,50E+08	3,10E+08	4,25E+08	6,41E+08	3,84E+08	3,35E+08	3,77E+08	4,82E+08
N_{adm}	**1,09E+07**	**1,10E+07**	**1,61E+07**	**1,99E+07**	**9,69E+06**	**1,46E+07**	**1,91E+07**	**1,14E+07**	**1,03E+07**	**1,33E+07**	**1,15E+07**
V_{REL}	**1,00**	**1,01**	**1,47**	**1,83**	**0,89**	**1,33**	**1,75**	**1,04**	**0,95**	**1,22**	**1,05**

Si analizamos estos resultados vemos que el substituir las mezclas convencionales por mezclas resistentes a fatiga apenas tiene efecto cuando se lleva a cabo el cálculo a 20ºC y resulta incluso perjudicial cuando se analiza a 5ºC. No ocurre lo mismo cuando capas de mezcla convencional son substituidas por mezclas de alto módulo, mejora los resultados cuando se analiza el firme a 20ºC y resulta mucho mejor cuando este análisis se lleva a cabo a 5ºC. Esto es debido al efecto mayor efecto que tiene tanto la penetración del betún como la temperatura en el módulo de rigidez del betún. Éste aumenta notablemente al bajar la temperatura o al emplear betunes más duros mientras que apenas varían las leyes de fatiga. Las leyes de fatiga de las mezclas con el betún B13/22 y el B60/70 a 5ºC son muy parecidos, mientras que sus módulos son muy diferentes. Esto hace también que el número de ciclos obtenidos para las diferentes secciones a 5ºC sean muy superiores a los determinados a 20ºC, Tabla 5.

Tabla 5. Aumento relativo del número de cargas admisibles (20ºC/5ºC).

	A	B1	B2	C1	C2	D1	D2	D3	D4	E1	E2
N_5 / N_{20}	25	14	100	100	16	17	17	14	20	100	20

No obstante existen dudas más que razonables sobre que la respuesta de los firmes respecto a la fisuración, que podría incluir tanto la fisuración térmica, como la de fatiga, como la superposición de ambos mecanismos de deterioro, sea mejor a bajas temperaturas que para temperaturas intermedias. Esto ha llevado a analizar dos conceptos que no son tenidos en cuenta en el cálculo de la vida a fatiga, como es el caso del límite de fatiga y la superposición de las tensiones térmicas con las de fatiga.

4. LÍMITE DE FATIGA

El límite de fatiga es el concepto básico sobre el que se establece toda la teoría sobre pavimentos de larga duración. Este límite de fatiga se define como la deformación unitaria de tracción por debajo de la cual no ocurren daños, es decir que bajo esa condición el firme se transforma en resistente a la fatiga para cualquier número de reiteraciones de carga a la que se vea sometido, Figura 13.

Como comprobación de esta teoría, se llevaron a cabo dos ensayos de fatiga a flexotracción en 4 puntos de larga duración, con los que se pretendía comprobar la existencia de este límite. Se emplearon dos mezclas diferentes, una G-20 con un betún B60/70 convencional y una mezcla especialmente diseñada para resistir a la fisuración por fatiga fabricada con un 5% sobre la masa de los áridos de un betún B60/70. La deformación aplicada fue de 70 µm/m ya que la bibliografía indicaba que el límite de fatiga para mezclas bituminosas se encontraba alrededor de este valor.

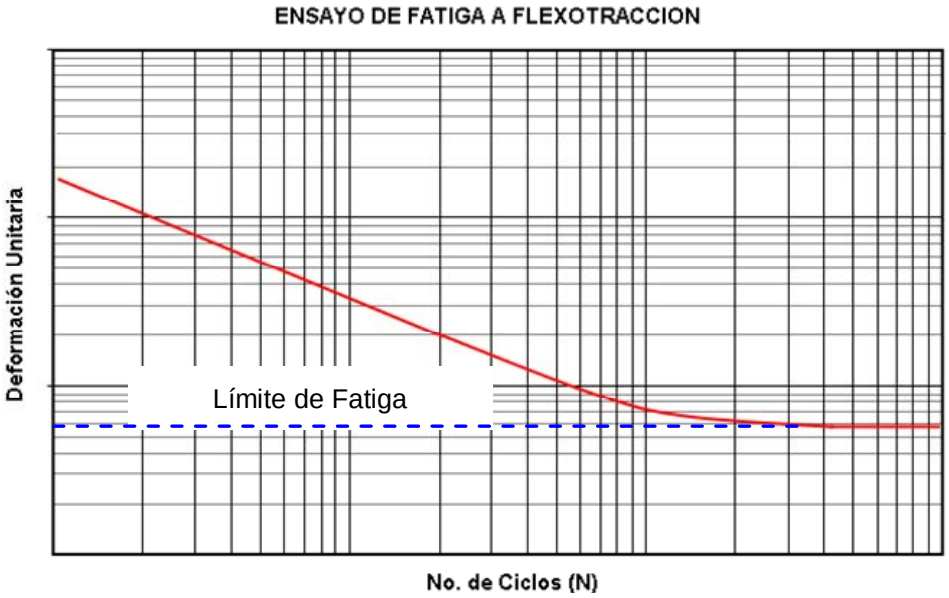


Figura 13. Concepto teórico del límite de fatiga (endurance limit).

Se realizó un ensayo de larga duración en que se aplicó a la mezcla convencional más de 15 millones de ciclos (más de 17 días de ensayo) y a la mezcla resistente a la fatiga más de 25 millones (más de 28 días) y en ambos casos no se llegó a la rotura de la probeta. La mezcla más resistente a la fatiga fue la más deformable y para el nivel de deformaciones impuesto resultó mucho más resistente, como se aprecia en la Figura 14, donde su representan los resultados de ambos ensayos. Parece, pues, que las mezclas bituminosas presentan un nivel de deformaciones en que es muy difícil llegar a su rotura. Además habría que considerar que estos ensayos se realizaron aplicando las cargas de forma continua, sin periodos de reposo, cosa que no ocurre en la realidad en el firme, donde pueden haber periodos más o menos largos entre las sucesivas aplicaciones de carga, lo que propicia una recuperación de las propiedades mecánicas de la mezcla y aumenta la resistencia a la fatiga. Todos estos factores son difíciles de tener en cuenta en el cálculo de la vida a fatiga de los firmes asfálticos, cuando se calcula el número de ciclos extrapolando las leyes de fatiga. El no considerar los límites de fatiga en el cálculo del número de aplicaciones de carga favorece a las mezclas con una ley de fatiga tendida (caso de las mezclas de alto módulo), y penaliza a las mezclas más dúctiles y resistentes a la fatiga cuya ley de fatiga presenta un mayor pendiente.

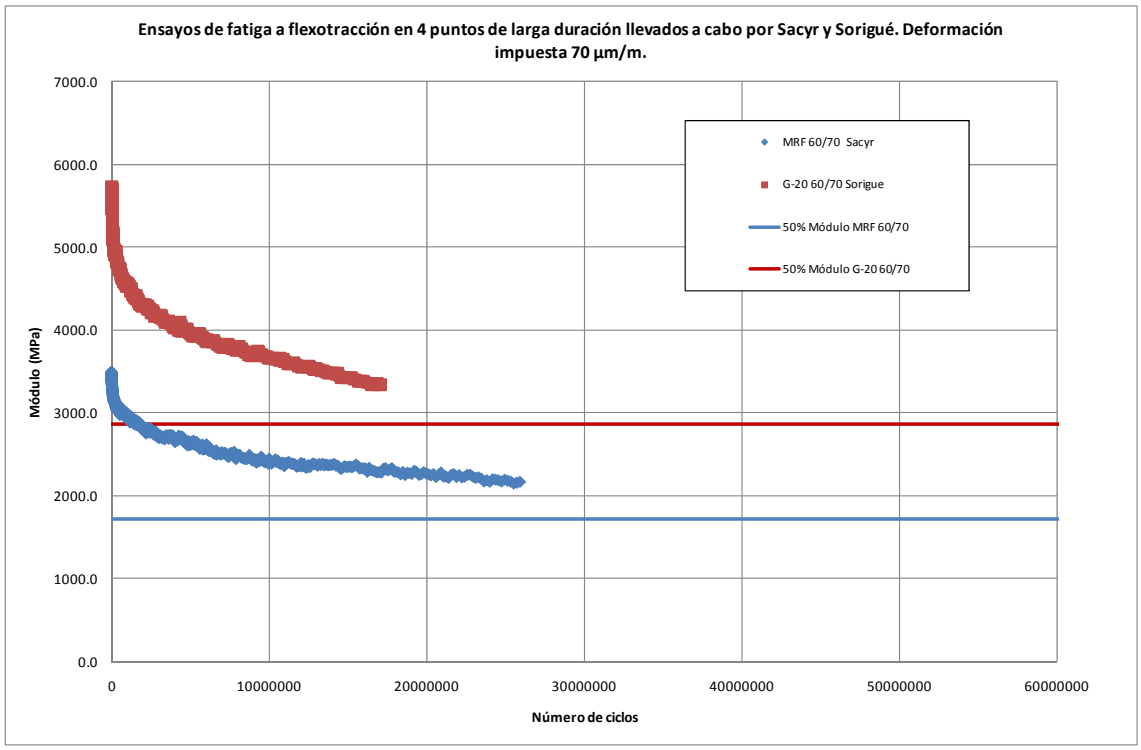


Figura 14. Evolución del módulo para los dos ensayos de larga duración y ajustes numéricos.

5. INFLUENCIA DE LAS TENSIONES TÉRMICAS EN EL COMPORTAMIENTO A FATIGA

Los programas de cálculo estructural no tienen en cuenta la influencia de las tensiones térmicas en el comportamiento a fatiga de los firmes. Por ello realizó un estudio donde se mostró que las tensiones térmicas contribuyen a reducir la vida a fatiga de las mezclas bituminosas.

Para ello se desarrolló el procedimiento de ensayo EBADE (Ensayo de BArrido de DEformaciones). El ensayo consiste en la aplicación de una serie de ciclos de carga de tensión-compresión, sobre una probeta prismática, a distintos niveles de deformación. La finalidad del procedimiento es establecer el comportamiento de la mezcla a fatiga, sometida o no a tensiones térmicas, a medida que se va aumentando la deformación impuesta.

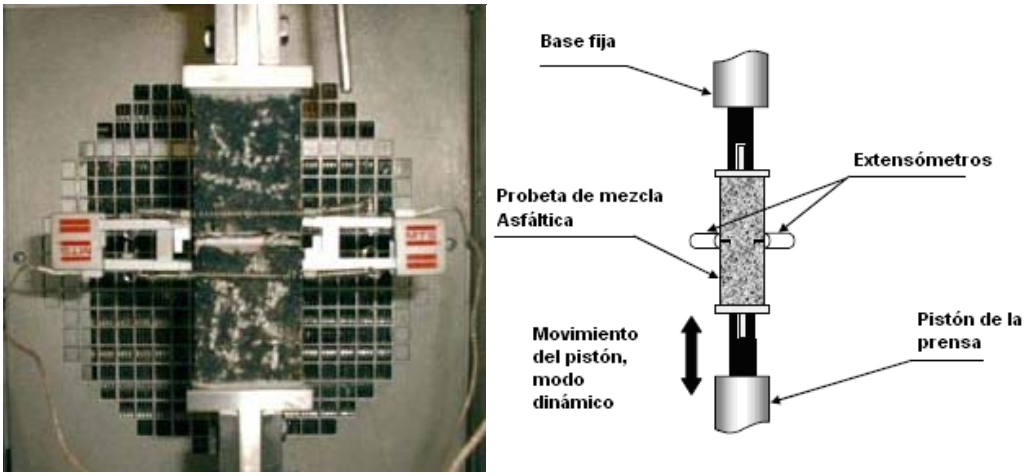


Figura 15. Montaje del ensayo EBADE en probetas prismáticas de mezcla bituminosa.

Antes de llevar a cabo este ensayo de fatiga se analizó cual era el nivel de tensiones a que podría estar sometida la mezcla al descender la temperatura y que influencia tendría el tipo de betún empleado. Para ello se empleó un betún duro (B13/22, mezclas de alto módulo) y un betún de mayor ductilidad (B60/70). Se realizó un ensayo de desplazamiento controlado donde la prensa iba registrando la carga necesaria para evitar la retracción térmica de la probeta, cuando la temperatura de la camara se redujo de 20 a 5ºC en dos horas. También se midió como se iba reduciendo esta tensión con el tiempo, relajación, al seguir manteniendo fijos los extremos de la probeta durante un periodo de 10 horas a 5ºC. Los resultados de este ensayo mostraron, Figura 16, el enorme efecto que tiene la penetración del betún en las tensiones térmicas que registra la mezcla y el tiempo tan largo que ha de transcurrir para su relajación. La mezcla con el betún blando registra un menor nivel de tensiones térmicas y se relaja con facilidad.

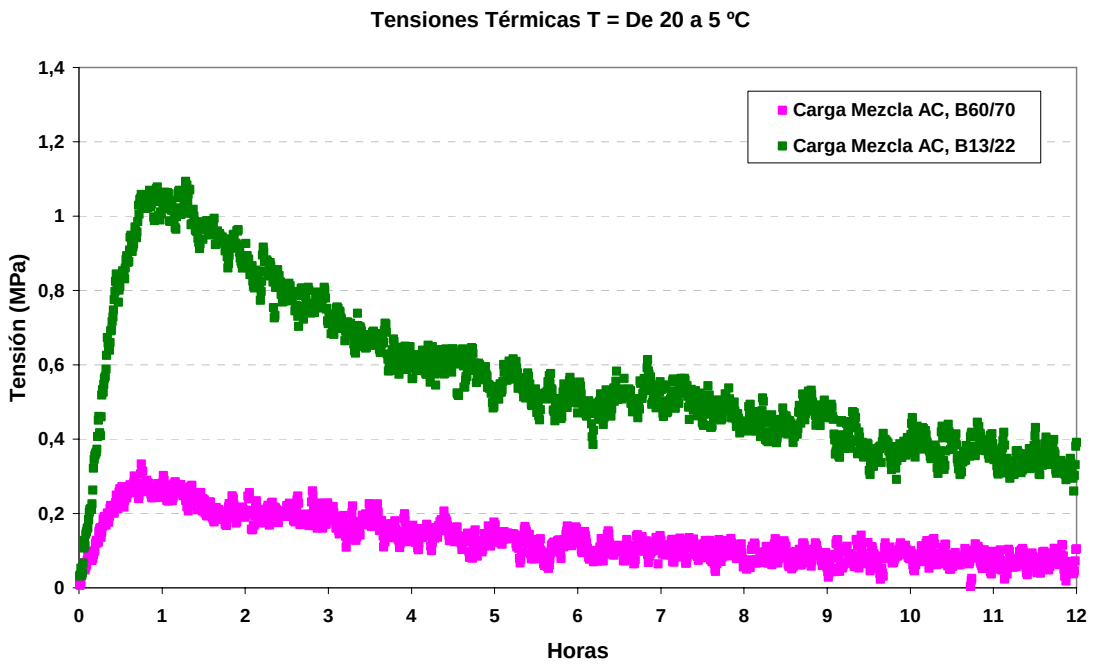


Figura 16.Tensiones térmicas registradas al disminuir la temperatura y mantener las probetas confinadas.

La comparación del ensayo EBADE con y sin tensiones térmicas, sirvió para poner de manifiesto que las tensiones producidas por el tráfico se suman a las de fatiga y esto hace que el fallo se produzca con un menor nivel de deformaciones. En la Figura 17, se observa como la mezcla fabricada con el ligante de menor penetración, B-13/22, rompe a una deformación inferior a la obtenida en el mismo procedimiento a 5ºC, sin tensiones térmicas iniciales. Sin embargo, para la mezcla confeccionada con el ligante B-60/70, las tensiones térmicas inducidas en el periodo evaluado no afectaron significativamente su nivel de deformación de rotura.

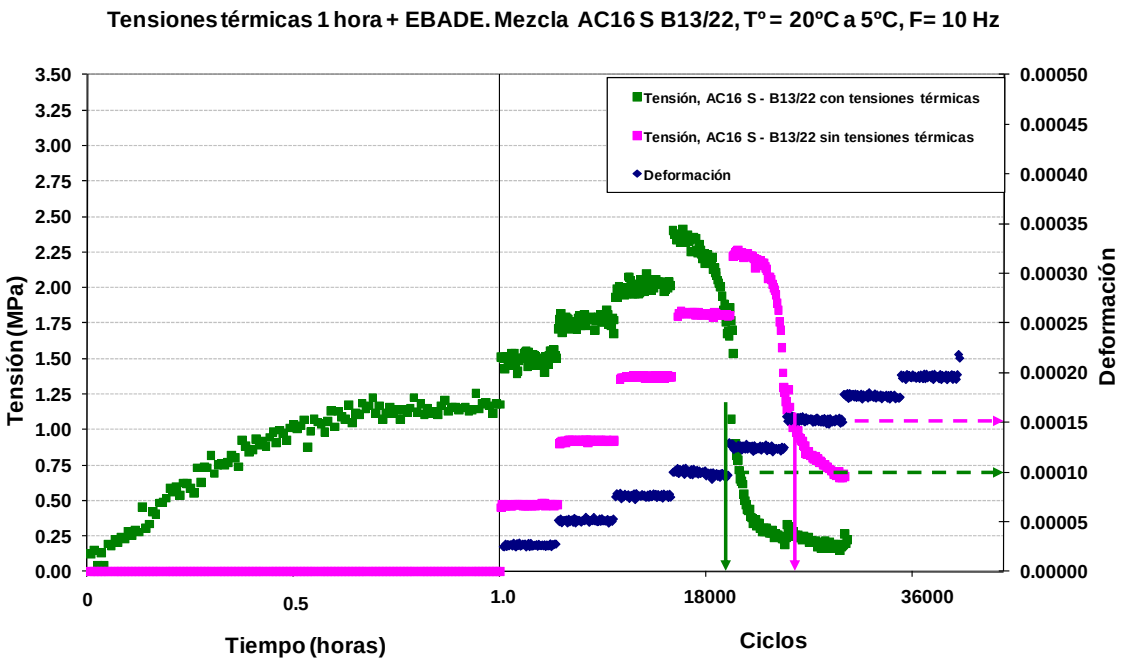


Figura 17. Respuesta de la mezcla AC 16 S fabricada con el betún B-13/22 al procedimiento de fatiga EBADE, con y sin tensiones térmicas después de un periodo de 1 hora, Tª de 20 a 5º.

Por lo tanto, queda claro que las tensiones térmicas producen un efecto negativo en la resistencia a fatiga de las mezclas bituminosas, especialmente cuando estás son muy rígidas. Este fenómeno debe ser tenido en cuenta ya que los programas de cálculo estructural otorgan a este tipo de mezclas los mejores resultados.

6. RECOMENDACIONES

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos a lo largo de todo el estudio, las recomendaciones respecto a la elección de secciones estructurales resistentes a la fatiga serán función de los factores se mencionan a continuación:

- Zona climática.
- Espesor del firme
- Categoría de tráfico.

En primer lugar los cálculos estructurales indicaron que las estructuras que emplearon mezclas de alto módulo en la capa de base fueron las que mayor número de repeticiones admitieron, tanto a 5ºC como a 10ºC. Ahora bien, estos cálculos no tuvieron en cuenta el efecto de las tensiones térmicas que pueden ser muy importantes y pueden contribuir a disminuir la vida a fatiga de la mezcla de forma drástica. Por ello, el empleo de secciones con mezclas de alto módulo en la

capa de base es recomendable en aquellas zonas en las que los gradientes térmicos no sean importantes.

El espesor de la sección del firme juega un papel muy importante en la transmisión de las deformaciones a la capa de base, cuanto mayor espesor menor deformación horizontal sufren las capas inferiores. Las mezclas de alto módulo han mostrado un comportamiento excepcional bajo niveles de deformación bajos, pero sus susceptibilidad al aumento de esta variable ha sido alto, es decir, su deformación de fallo ha sido baja comparada con la de las mezclas más flexibles. En consecuencia para casos en los que el espesor del firme sea importante las mezclas de alto módulo deben ser la opción principal, ya que las deformaciones que pueden sufrir en estas condiciones son bajas y por lo tanto su comportamiento a fatiga será bueno. Adicionalmente, un mayor espesor del firme favorecerá la disminución de los gradientes térmicos de las capas inferiores, lo cual de nuevo favorece a este tipo de mezclas. Por otro lado, si el firme presenta un espesor reducido, las deformaciones que puede sufrir la capa inferior pueden fácilmente superar la deformación máxima que admiten este tipo de mezclas, y por lo tanto en estos casos será más recomendable emplear mezclas más flexibles. De nuevo, tener en cuenta que a menor espesor, mayor transmisión de calor y por lo tanto mayores gradientes térmicos.

En resumen, la sección más adecuada para evitar la propagación de fisuras ascendentes debidas a la fatiga dependerá de la categoría de tráfico de la vía. Para las categorías de tráfico T0 y T00, para las cuales se requieren espesores mayores, las secciones más adecuadas serán aquellas que tengan por capa de base mezclas de alto módulo, mientras que para categorías de tráfico inferiores como las T1 y T2, para las cuales no se requieren espesores de capa tan elevados, será conveniente emplear mezclas más flexibles capaces de soportar niveles de deformación y gradientes de temperatura más elevados. Sería recomendable por tanto, si se quiere aumentar la vida a fatiga de los firmes, emplear en la capa de base los siguientes tipos de mezcla:

Tabla 6. Secciones estructurales recomendadas para garantizar un buen comportamiento a fatiga del firme

	Tráfico				
Clima	T0	T00	T1	T2	T3
Fría	Alto Módulo		Resistente a Fatiga		
Cálido	Alto Módulo			Resistente a Fatiga	

El espesor del firme podría ser el indicado por la actual instrucción, pero modificando el tipo de mezcla en la primera tongada o en todo el espesor de la capa de base.

ENVEJECIMIENTO Y DURABILIDAD: FOTOOXIDACIÓN Y OXIDACIÓN TÉRMICA DE LOS LIGANTES BITUMINOSOS

AUTORES

Antonio Pérez Lepe (Repsol), Nuria Querol (Sorigué)

1. INTRODUCCIÓN

El envejecimiento oxidativo del asfalto tiene una especial relevancia en la durabilidad y ciclo de vida de las mezclas bituminosas durante la puesta en servicio del firme, así como en las etapas previas de fabricación de la mezcla y en etapas posteriores de reciclado. En efecto, la reciclabilidad de un pavimento envejecido tiene mucho que ver con el estado de envejecimiento del ligante. Entender los procesos a través de los cuales el betún y la mezcla van perdiendo funcionalidad a lo largo de todo el ciclo de vida es clave para actuar desde el inicio y conseguir una mayor durabilidad de la carretera.

La temperatura es considerada como el parámetro clave en el grado de envejecimiento oxidativo, sin embargo, la naturaleza del betún, el grosor de película de ligante, la exposición al aire, el agua, la radiación solar, la disposición en las diferentes capas o las condiciones de fabricación de las mezclas van a tener una enorme influencia en los procesos oxidativos y de envejecimiento en general.

La capa de rodadura es especialmente sensible a los fenómenos de envejecimiento por su mayor exposición a todos los factores implicados en los fenómenos de oxidación. En capas de rodadura delgadas donde el número de huecos es amplio se aceleran aún más estos procesos. Para capas de rodadura porosas, se suele hablar de un 7% de huecos como límite genérico a partir del cual la exposición a la acción del oxígeno aumenta drásticamente por la interconexión de poros, haciendo progresar los fenómenos oxidativos desde la capa más superficial (5mm) hasta todo el grosor de la capa de rodadura.

De manera general, el envejecimiento va a provocar unos cambios a nivel químico y físico del betún. Por la acción del oxígeno van a tener lugar reacciones de deshidrogenación, oxidación de sulfuros y carbonos bencílicos, formación de ácidos orgánicos, reacciones de polimerización y condensación, volatilización, aumento de acidez y polaridad, y una evolución de especies desde más ligeras a más pesadas en el betún (debido a las reacciones citadas, el porcentaje de la fracción de aromáticos disminuye por un aumento progresivo hacia resinas y asfaltenos). Estos cambios químicos tienen su repercusión en la estructura del betún, caracterizada por una mayor interacción intermolecular, agregación y condensación de cadenas,

estructura tipo SOL tendiendo hacia tipo GEL, aumento de viscosidad y fragilidad y por una pérdida de cohesión interna.

El envejecimiento del ligante puede evaluarse en laboratorio bien sobre una película del propio ligante (EN 12607, 15323 o 14769) o bien mediante un calentamiento en estufa del aglomerado (compactado o no). El envejecimiento a corto plazo (RTFOT) se atribuye a las operaciones de almacenamiento, fabricación de la mezcla y extendido. El envejecimiento a largo plazo (PAV) prosigue a partir de aquí durante la puesta en servicio de la carretera.

Se presentan en el presente capítulo algunos resultados obtenidos de manera sistemática mediante estos dos procedimientos normalizados que han ayudado a comprender la evolución físico-química de los betunes durante el envejecimiento (caracterizada mediante ensayos de penetración, anillo-bola, viscosidad, reología en cizalla dinámica, cromatografía y espectrometría infrarroja) con el objetivo de evaluar la reciclabilidad de las mezclas.

Los estudios realizados son especialmente relevantes porque analizan tipologías de ligantes (con y sin agentes rejuvenecedores) muy diversas, por lo que las conclusiones extraídas adquieren mayor relevancia al cubrir un amplio campo de aplicación.

A menudo, el efecto causado por la radiación solar no se incluye en las simulaciones de envejecimiento de asfaltos en laboratorio. Sin embargo, el efecto causado por la radiación, a nivel molecular del betún, puede además acelerar los propios procesos de envejecimiento térmico en el pavimento o alterar la sensibilidad al agua de las mezclas asfálticas, en las capas de rodadura.

En el presente capítulo se muestra, en segundo lugar, un trabajo centrado en los fenómenos de oxidación que tienen lugar por la acción de la radiación ultravioleta. Se propone un método práctico para evaluar la incidencia en la composición química y física de los betunes. Se proponen algunos sistemas protectores para hacer frente a los defectos que a través de la “piel de la carretera” van a provocar una pérdida de funcionalidad de la misma.

2. ENVEJECIMIENTO TÉRMICO DE LIGANTES BITUMINOSOS

Desde el punto de vista químico, el betún es una mezcla compleja de sustancias que dependiendo del crudo de origen y del esquema o proceso de refino, presenta una gran variabilidad de especies. En ocasiones, los betunes suelen denominarse en función de que el crudo presente un carácter parafínico, nafténico o aromático, según presenten abundancia de estructuras saturadas, parafínicas o aromáticas, respectivamente. De forma más específica, el betún suele fraccionarse en cuatro o cinco fracciones importantes según su afinidad a distintos disolventes. El modelo coloidal del betún (Nellensteyn-Pfeiffer) describe la estructura del betún como agregados de moléculas de asfaltenos peptizados por resinas (bases nitrogenadas polares) y aromáticos, en un medio de saturados (con poder gelificante y floculante de asfaltenos) y resto de aromáticos. Así, un betún con muchos asfaltenos y pocas resinas daría lugar a una estructura parcialmente gelificada (esquema B en la figura 1) y frágil.

Con el paso del tiempo, el betún sufre procesos de envejecimiento por los cuales se produce una migración en las fracciones más ligeras del betún hacia las más pesadas (aromáticos y saturados pasan a resinas. Resinas pasan a asfaltenos), produciendo un material más frágil, de menor penetración, debido al endurecimiento. La nueva situación podría describirse como un medio de asfaltenos más polares y aromáticos, en mayor número y mayor estado de agregación, frente a resinas menos polares con menor poder peptizante, es decir, un material residuo tipo gel, que eventualmente puede dar lugar a una pérdida de continuidad en el ligante, y por consiguiente en el firme, con microfisuraciones (proceso de Fatiga del material). Además, si en el ligante existe polímero, éste también se ve sometido a procesos de envejecimiento, por acción mecánica y térmica, iniciados por la ruptura de dobles enlaces en PB y una repartición del polímero en el betún más extensa. Sin embargo para los betunes reticulados con SBR y SBS el envejecimiento en este sentido es menor, probando la importancia de la microestructura inicial del ligante ante el envejecimiento.

El objetivo de este estudio es evaluar los cambios de las propiedades físicas y químicas de cuatro betunes distintos, empleados en un reciclado al 50%, haciendo los ensayos siguientes, haciendo especial hincapié en su comportamiento a envejecimiento.

Considerando las etapas de envejecimiento, para simular los fenómenos de oxidación que afectan a los ligantes bituminosos, se ha estudiado los cambios después una primera etapa, denominada envejecimiento RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test), foto 1. Esa etapa representa la fase de mezclado del betún con los áridos en planta de fabricación y el envejecimiento que afecta al ligante durante el transporte y la puesta en obra, lo que se describe como el envejecimiento a corto plazo (descrito en inglés como “short-term ageing”).

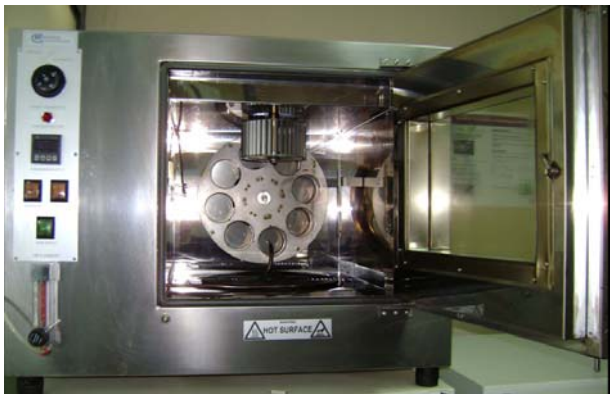


Figura 1: Equipo RTFOT

Por otra parte, se sabe que el envejecimiento a largo plazo, simulado por el ensayo a presión (2 bares) y temperatura (100ºC) PAV (Pressure Ageing Vessel), representa el efecto de oxidación y de la acción de los rayos UV que afectan a la capa de superficie de los ligantes durante toda la vida útil del pavimento. Por esta razón se han realizado los mismos ensayos descritos, sobre los betunes después un envejecimiento PAV.

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

Tabla 1. Descripción de los ligantes evaluados

Estos cuatro ligantes ya habían sido estudiados en el trabajo de del Pozo et al. centrándose en la influencia del envejecimiento térmico en las características reológicas y en la composición química determinada mediante el método Iatroscan.

En este nuevo trabajo se ha completado el estudio reológico con una caracterización química de los ligantes mediante espectroscopía infrarroja. Esta

metodología de ensayo también se ha utilizado en la segunda sección del estudio, centrada en la oxidación fotooxidativa de los ligantes bituminosos.

Adicionalmente, se ha completado la caracterización mediante la determinación de las propiedades reológicas a baja temperatura por medio del BBR (bending beam rheometer). Estas características habían quedado pendientes de evaluar en el trabajo anteriormente citado, en el que tan sólo se utilizó el Punto de Fragilidad Fraass como método de evaluación del comportamiento a baja temperatura.

3. ANÁLISIS POR ESPECTROSCOPÍA INFRARROJA

Desde otro punto de vista, también puede evaluarse la evolución no de especies sino de grupos funcionales característicos. En el caso de cromatografía no hay que olvidar que los que se está fraccionando son especies que presentan mayor o menor afinidad a ciertos disolventes. Mediante la técnica de infrarrojos se puede evaluar la evolución de ciertos grupos característicos y observar ambos procesos de envejecimiento a través de ello.

Esta espectroscopía se fundamenta en la absorción de la radiación IR por las moléculas en vibración. Una molécula absorberá la energía de un haz de luz infrarroja cuando dicha energía incidente sea igual a la necesaria para que se dé una transición vibracional de la molécula. Es decir, la molécula comienza a vibrar de una determinada manera gracias a la energía que se le suministra mediante luz infrarroja.

Pueden distinguirse dos categorías básicas de vibraciones: de tensión y de flexión. Las vibraciones de tensión son cambios en la distancia interatómica a lo largo del eje del enlace entre dos átomos. Las vibraciones de flexión están originadas por cambios en el ángulo que forman dos enlaces. En la siguiente figura se representan los diferentes tipos de vibraciones moleculares.

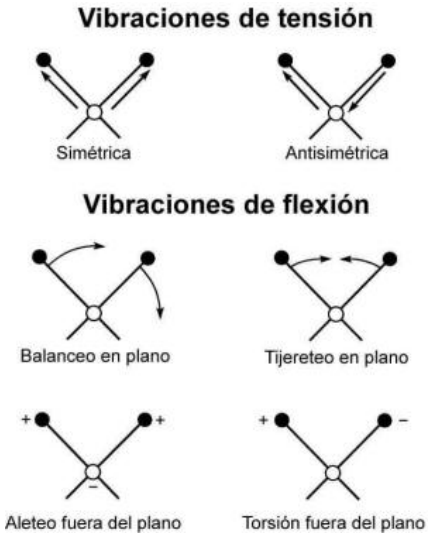


Figura 2. Modos vibracionales de las moléculas

En principio, cada molécula presenta un espectro IR característico (huella dactilar), debido a que todas las moléculas (excepto las especies diatómicas homonucleares como O2 y Br2) tienen algunas vibraciones que, al activarse, provocan la absorción de una determinada longitud de onda en la zona del espectro electromagnético correspondiente al infrarrojo.

De esta forma, analizando cuales son las longitudes de onda que absorbe una sustancia en la zona del infrarrojo, podemos obtener información acerca de las moléculas que componen dicha sustancia.

Frecuencias características de grupos orgánicos poliatómicos f = fuerte, m = medio, d = débil			
Tipo de vibración		Frecuencia (cm^{-1})	Intensidad
C-H	Alcanos (tensión)	3000-2850	f
	$-CH_3$ (flexión)	1450 y 1375	m
	$-CH_2-$ (flexión)	1465	m
	Alquenos (tensión)	3100-3000	m
	Alquenos (fuera del plano de flexión)	1000-650	f
	Aromáticos (tensión)	3150-3050	f
	Aromáticos (fuera del plano de flexión)	900-690	f
C=C	Alqueno	1680-1600	m-d
	Aromáticos	1600 y 1475	m-d
C=C	Aldehído	1740-1720	f
	Cetona	1725-1705	f
	Ácidos carboxílicos	1725-1700	f
	Éster	1750-1730	f
	Anhídridos	1810 y 1760	f
S=O	Sulfóxidos	1050	f

Tabla 2: Frecuencias características de algunos grupos orgánicos poliatómicos

Se han estudiado los betunes mediante dos técnicas o métodos de infrarrojos. En un primer momento, se ha evaluado un betún convencional y después de envejecimiento mediante FTIR-ATR (Fourier Transform Infrared - Attenuated Total Reflectance). Mediante esta técnica, se coloca una muestra de betún sólida (sin disolver) y se mide la radiación no absorbida por la superficie de dicha muestra ante un solo punto de incidencia del haz de luz. Es un método muy fácil (ya que no requiere pretratamiento de la muestra), pero que no permite una buena evaluación cuantitativa.

Por ello, se han realizado ensayos aplicando un método de disolución de la muestra de betún en una cantidad fija de diclorometano. Dicha disolución se coloca sobre una pastilla de KBr, donde se evapora el disolvente (técnica de planto seco).

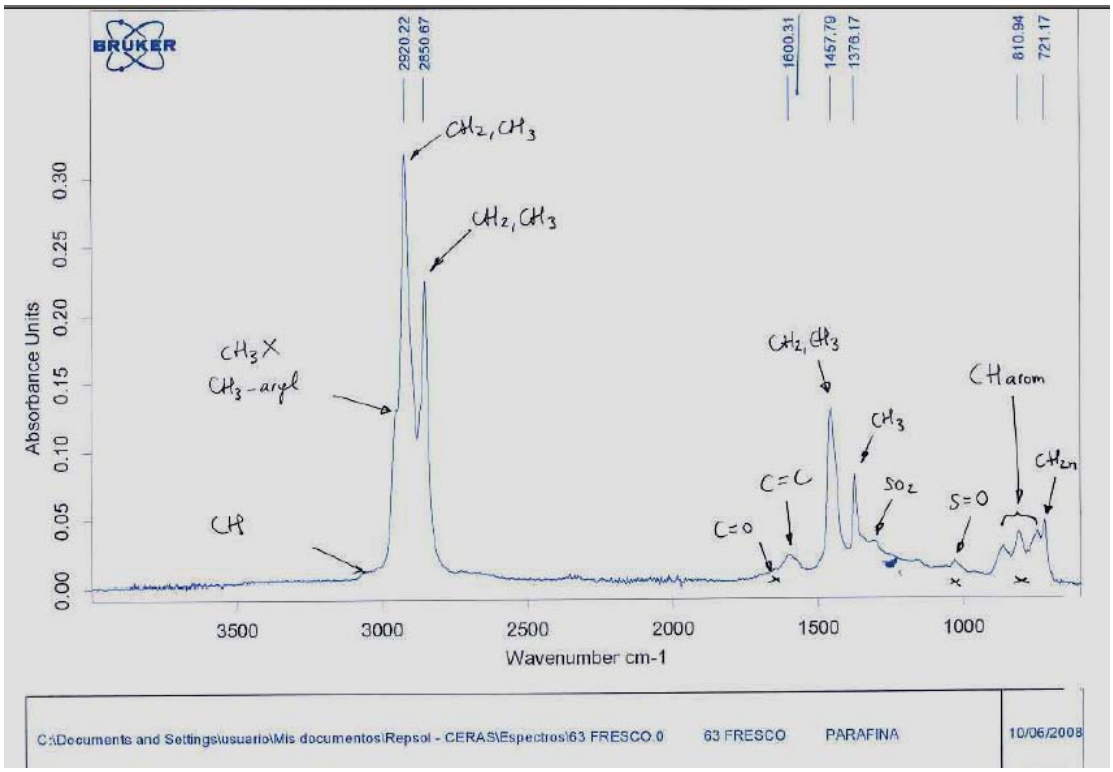


Figura 3. Espectro de infrarrojos, mediante ATR, de un betún convencional. Se muestran los picos característicos del betún.

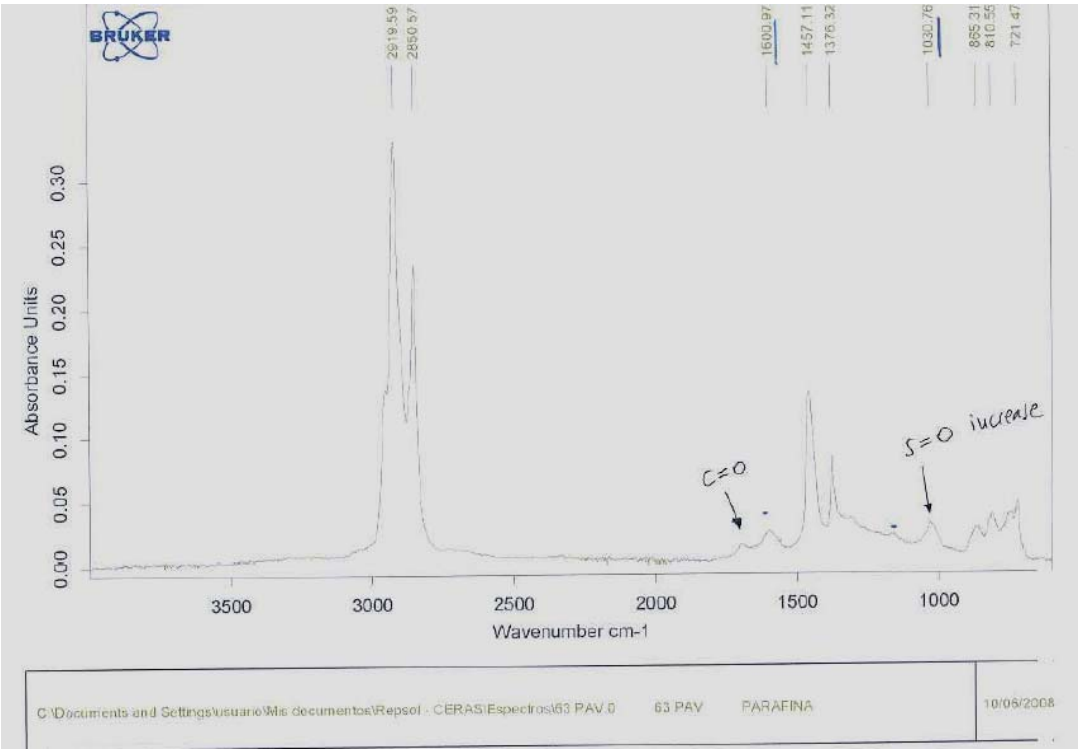


Figura 4. Espectros de infrarrojos, mediante ATR, del betún tras el ensayo PAV. Se muestran las bandas que sufren un mayor aumento tras el ensayo de PAV.

El análisis semicuantitativo se ha llevado a cabo mediante la técnica dry-plate. Este análisis no se ha llevado a cabo teniendo en cuenta la altura de los picos de absorción sino el área del pico, de valle a valle, ya que muchas vibraciones del mismo tipo pueden aparecer solapadas (es el caso del grupo C=O en cetonas, ácidos y ésteres, que aparecen entre 1753 y 1635 cm-1).

Índices utilizados para el análisis:

Se registraron las áreas correspondientes a los picos siguientes, cuya suma se ha utilizado para normalizar.

ΣA= A1700 + A1600 + A1460 + A1376 + A1030 + A864 + A 814 + A743 + A 724 + A(2953, 2923, 2862)

-Estructuras aromáticas: A1600/ ΣA

-Estructuras alifáticas: (A1460 + A1376)/ ΣA

Alifáticas de cadena larga: A724/(A1460+A1376)

Alifáticas ramificadas: A1376/(A1460+A1376)

-Funciones oxigenadas:

Carbonilo: A1700/ ΣA

Sulfóxido: A1030/ ΣA

Para un betún convencional y el mismo betún tras RTFOT y PAV, obtenemos los siguientes resultados (betún fuera de Fénix):

	Estruc. AROM	Estruc. ALIF	Ramificados	Cadena larga	Carbonilo	Sulfóxido
Betún rejuv	-2,428	0,285	0,704	-0,069	-0,359	-1,826
Tras envejecimiento RTFOT	0,046	-1,827	1,012	1,495	-0,304	-1,026
Tras envej. PAV	-1,377	-0,972	0,575	0,245	0,115	0,468

Tabla 3: ejemplo de un betún rejuvenecido

Estos resultados numéricos corresponden a los valores de las áreas normalizadas a la suma total de áreas seleccionadas, mencionadas anteriormente, menos el valor promedio de 8 células, divididos por el valor de desviación estándar.

RTFOT: se observa un aumento de grupos sulfóxidos y un leve aumento de carbonilos junto con un aumento de grupos aromáticos. Estos tres van a ser los índices que aporten un significado correspondiente a la oxidación del betún.

PAV: prosigue el aumento de grupos carbonilos y sulfóxidos.

Se han sometido a esta técnica los betunes A B y D al principio y tras un envejecimiento RTFOT. Es importante notar que por ese estudio no se ha considerado el ligante C, teniendo en cuenta la improbabilidad de utilizar tal ligante (mezcla viejo+ 60/70).

Ligante	Estruc. Arom	Estruc. Alif	Ramificados	Cadena Larga	Carbonilo	Sulfóxido
A	0,294	0,923	-0,439	-0,579	-0,414	-0,237
A + RTFOT	0,944	0,688	-0,696	-0,878	-0,147	0,460
B	0,470	0,902	-0,783	-0,817	-0,277	0,289
B + RTFOT	0,881	0,787	-0,526	-0,689	-0,154	0,229
D	0,391	-0,426	1,150	1,579	-0,588	-1,016
D + RTFOT	0,441	-0,227	1,202	1,494	-0,502	-0,521

Tabla 4: resultados de IR

En la siguiente tabla se presenta la variación en tanto por uno del área tras RTFOT, respecto al valor inicial:

Variación tras RTFOT = (tras RTFOT- inicial)/inicial

Ligante	Estruc. Arom	Estruc. Alif	Ramificados	Cadena Larga	Carbonilo	Sulfóxido
A	2,212	-0,254	-0,584	-0,517	0,646	2,942
B	0,875	-0,127	0,328	0,156	0,446	-0,207
D	0,128	-0,349	0,045	-0,054	0,146	0,487

Tabla 5: variación de los resultados IR

El proceso de envejecimiento RTFOT del betún D indica un aumento en sulfóxido y un leve aumento en carbonilo y CH aromáticos.

Para el caso del betún A, se produce un aumento muy superior en S=O y un aumento mayor en C=O y aromáticos. Por lo tanto, el betún A está en un estado más oxidado tras RTFOT.

El betún con rejuvenecedor, ligante B, presenta un menor aumento en carbonilo y no presenta aumento en la cantidad de S=O. El aumento en aromaticidad también es bastante inferior al caso A. Por tanto, el betún con rejuvenecedor presenta un estado menos oxidado tras RTFOT que el betún con 150/200, confirmando así los resultados presentados anteriormente en la caracterización reológica.

4. ENSAYOS A BAJA TEMPERATURA BBR (Bending Beam Rheometer)

El reómetro de flexión de viga (BBR) proporciona una medida de la rigidez del material a baja temperatura y la relajación de los esfuerzos generados con la aplicación de una carga. Esta información da idea de la resistencia del ligante para resistir el cracking a baja temperatura. El ensayo consiste en aplicar una carga en el centro de una probeta en forma de viga (como se aprecia en las figuras) y registrar la deflexión en el tiempo.

Los parámetros que se reportan para este ensayo suelen ser, el valor de S y el valor de la pendiente m, ambos a 60s. Para acortar el tiempo de ensayo, se limitó éste a 60s, a cambio de subir 10ºC la temperatura del ensayo, respecto a la temperatura real del entorno en puesta en servicio. La especificación americana indica que el ligante debe presentar un módulo ≤ 300 MPa y una pendiente ≥ 0.300 y se reporta la mayor temperatura para la cual se cumple estos valores. Fuera de dicha especificación, a los ligantes evaluados se les ha realizado el test a dos

temperaturas distintas y fijas: -16ºC y -6ºC, pudiéndose obtener una tendencia en temperatura del comportamiento a baja temperatura de todos los ligantes evaluados. En la siguiente tabla se muestran los valores de S y m a 60s para los ligantes evaluados a dos temperaturas:

Temperatura	-16ºC		-6ºC	
	S(60s)	m(60s)	S(60s)	m(60s)
Betún A	193.3	0.305	52.6	0.380
Betún B	197.7	0.365	35.9	0.503
Betún C	277.7	0.267	87.3	0.340
Betún D	195.3	0.287	58.7	0.345

Tabla 6. Resultado de ensayos en reómetro de viga BBR para los betunes de nuevo aporte denominados A, B, C y D, propuestos para el reciclado al 50%.

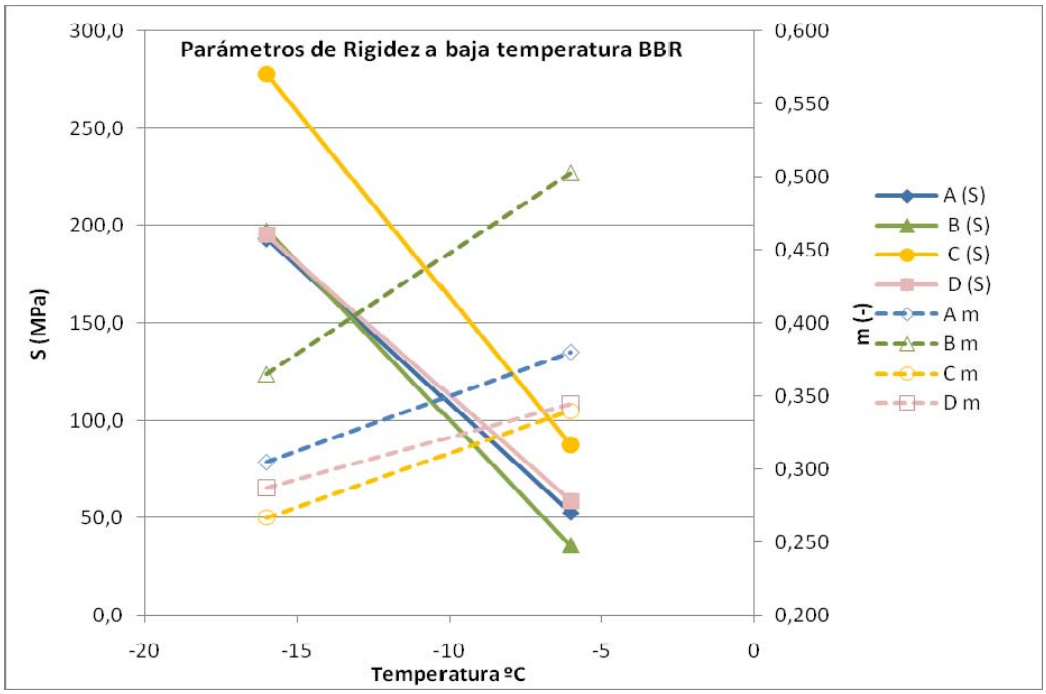


Figura 5. Representación de parámetros de rigidez a baja temperatura obtenidos en el ensayo BBR, a dos temperaturas, para los betunes denominados A, B, C y D, propuestos para el reciclado al 50%.

Sin tener en cuenta el comportamiento del betún C (mezcla de betún antiguo y betún 60/70), se observa cómo el comportamiento a baja temperatura del betún B (betún viejo + rejuvenecedor) es muy superior al caso de los ligantes A (betún viejo + B150/200) y D (60/70 de referencia). A -16ºC (-26ºC reales), el comportamiento de los tres betunes es equiparable en módulo, sin embargo el ligante B presenta valores de pendiente m bastante más elevados. A -6ºC, el efecto es aún más acentuado, con menor rigidez y mayor velocidad de liberación de esfuerzos, equivalente a mayor resistencia a la fisuración.

5. CONCLUSIONES

La espectroscopía infrarroja es una técnica adecuada para evaluar la susceptibilidad a la oxidación de los ligantes bituminosos. Su simplicidad experimental y la pequeña cantidad de muestra que requiere son dos importantes alicientes para su empleo como método de caracterización del betún.

Los ensayos realizados sobre los diferentes ligantes, en la zona de baja temperatura (BBR y Fraass) han aportado datos muy interesantes sobre el comportamiento frágil que presentan los betunes envejecidos, que permite diseñar productos específicos para cada aplicación.

6. ENVEJECIMIENTO FOTO-OXIDATIVO DE BETUNES ASFÁLTICOS.

El 85% de los accidentes mortales en carretera se deben al fallo humano y sólo un 10% son consecuencia de la mala conservación de las vías, según las estadísticas de la DGT. Sin embargo, "el estado del firme tiene una repercusión básica en estas muertes", afirma Mario Arnaldo, presidente de Automovilistas Europeos Asociados (AEA). "Serían necesarios cerca de 30.000 millones de euros para poner a punto la red de carreteras españolas", según estimaciones de la organización.

El término envejecimiento se refiere al fenómeno global de evolución lenta e irreversible de la alteración de las propiedades físico-químicas del material. El envejecimiento de asfaltos y mezclas asfálticas se lleva estudiando desde principios del siglo pasado (Dow, (1903) como se cita en Bell (1989)). Las primeras investigaciones iban enfocadas al desarrollo de métodos y ensayos que relacionaran la evolución de las propiedades del ligante en servicio, mediante pruebas que simularan los efectos de la intemperie en condiciones aceleradas. A menudo, el efecto causado por la radiación solar no se incluye en las simulaciones de envejecimiento de asfaltos en laboratorio. Sin embargo, el efecto causado por la radiación, a nivel molecular del betún, puede además acelerar los propios procesos de envejecimiento térmico en el pavimento o alterar la sensibilidad al agua de las mezclas asfálticas, en las capas de rodadura.

Bocci et al, 2000, establecieron que la radiación ultravioleta afecta de manera diferente de acuerdo al origen de los asfaltos. Hugo et al, 1985, encontró efectos de endurecimiento dentro de los primeros 5 mm y los compara con viscosidades 2 mm más profundas. Kempt et al, 1981, afirma que la radiación con luz “actínica” afecta hasta 5 micras de la película de betún.

Finalmente Afanasieva et al, 2002, indicaron, en un estudio realizado empleando asfaltos colombianos, que la radiación tipo UVB es la que causa un mayor daño sobre las mezclas. Dentro de la fracción UV, la más dañina para la conservación del asfalto es la fracción UV-B (280-315 nm).

En el presente trabajo se presenta un método sistemático de evaluación química del envejecimiento acelerado ante la radiación ultravioleta de diferentes betunes asfálticos, mediante el cual se evalúa el posible efecto anti-envejecimiento de diferentes aditivos.

7. ENVEJECIMIENTO DE BETUNES

Las principales causas de envejecimiento de un betún son la pérdida de volátiles y la oxidación de ciertas moléculas con la formación de interacciones fuertes entre grupos que contienen oxígeno. La luz ultravioleta (fotodegradación) y la evaporación (volatilización) contribuyen al envejecimiento (1).

Cuando un betún envejece a través de procesos de oxidación, los puntos potencialmente activos de las moléculas (como hidrógenos bencílicos y sulfuros alifáticos) se convierten a través de su reacción con oxígeno en puntos polares (carbonilos y sulfóxidos respectivamente). Estos puntos polares contribuyen a aumentar las interacciones polar-polar conduciendo a un aumento de la viscosidad. Después de la oxidación, muchas de las interacciones polar-polar conducen a la formación de cadenas, provocando una mayor ganancia en la viscosidad y mayores índices de envejecimiento a través de procesos de polimerización o condensación.

Los efectos de la oxidación de la estructura del betún se pueden resumir en:

- Deshidrogenación
- Oxidación de sulfuros de alquilo a sulfóxidos
- Oxidación de carbonos bencílicos a carbonilos
- Ruptura de cadenas con la consiguiente formación de ácidos orgánicos.

Estos procesos conducen al aumento de la aromaticidad, de la polaridad, de la acidez y a la condensación de las moléculas. Los grupos funcionales que sufren en mayor medida la oxidación son los carbonilos y sulfóxidos. Estos cambios que se producen en un betún durante su envejecimiento pueden ser estudiados mediante espectroscopía de infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) que indica la presencia o ausencia de grupos funcionales (1).

8. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL Y DEL MÉTODO ANALÍTICO

EQUIPO EXPERIMENTAL. Atendiendo al objetivo marcado para esta actividad la instalación ha de contar con los siguientes dispositivos:

- Suministro de aire a presión (mínimo 2 bares). El aire de partida es seco (~ 2% de humedad relativa).
- Medidor y controlador de flujo de aire
- Sistema de humidificación del aire
- Medidor de humedad del aire
- Sistema de control de temperatura
- Cámara de ensayos

- Sistema de irradiación UV

En la figura 1 se ha recogido un esquema de la instalación diseñada para esta operación.

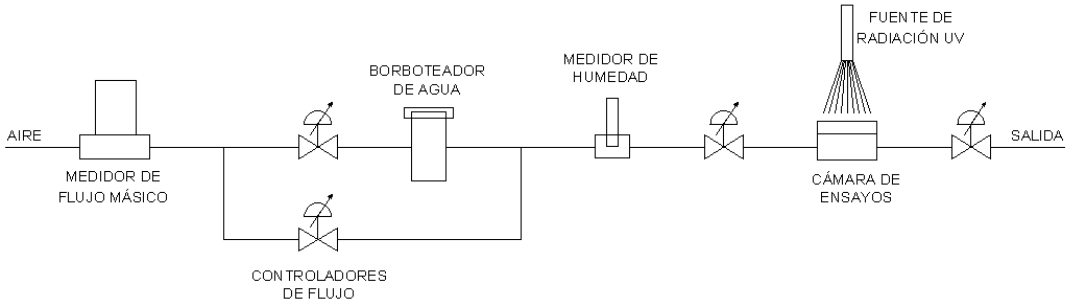


Figura 1. Esquema de la instalación para estudiar el envejecimiento de asfaltos.

El funcionamiento de la instalación es muy simple, se introduce aire con un caudal controlado y con los controladores de flujo se modula el caudal a través del borboteador de agua para fijar la humedad relativa del mismo. Con este sistema se puede operar en un rango de humedades relativas entre el 3 y el 90 %.

La instalación permite trabajar con una corriente de aire circulante por la cámara de ensayos o trabajar en cámara cerrada (cargando el sistema y cerrando las válvulas que hay a la entrada y salida de la cámara). Una vez estabilizado el flujo se enciende la fuente de radiación y se comenzaría a contar el tiempo de experiencia.

Con la instalación experimental se consigue realizar el envejecimiento de los betunes empleando la radiación UV como principal agente inductor en unas condiciones de temperatura, humedad y flujo de aire controladas.

8.1 MÉTODO ANALÍTICO

Existen varios procedimientos para el análisis con FTIR en cuanto al sistema de introducción de la muestra en el equipo. El primero y el más simple, es el empleo del dispositivo de Reflectancia Total Atenuada (ATR) de punta de diamante del que dispone el equipo. Con este sistema no destructivo simplemente se ha de situar la placa con el betún sobre el dispositivo y tomar la medida. A continuación se puede devolver la placa de betún a la instalación de envejecimiento. Otro de los métodos que se puede emplear consiste en la preparación de una pastilla convencional de KBr con parte del betún extraído de la superficie de la muestra. El último de los métodos consiste en disolver una pequeña muestra de betún tomado de la superficie en tetrahidrofurano (THF) y analizarlo con la celda de líquidos del equipo.

Para realizar este estudio se ha empleado el primero de los procedimientos mencionados anteriormente ya que es el método más cómodo y rápido y el único que no es destructivo. En la figura 2 se tiene una imagen del equipo FTIR empleado y un detalle del dispositivo ATR de punta de diamante utilizado.

Figura 2. Equipo FTIR empleado (izda.). Dispositivo ATR utilizado (dcha.).

8.2 ENSAYOS PREVIOS

En primer lugar se analizó un betún convencional suministrado por REPSOL. Para preparar la muestra simplemente se le calentó a 50 ºC y a continuación se extendió sobre un porta de vidrio de los usados comúnmente en microscopía óptica.

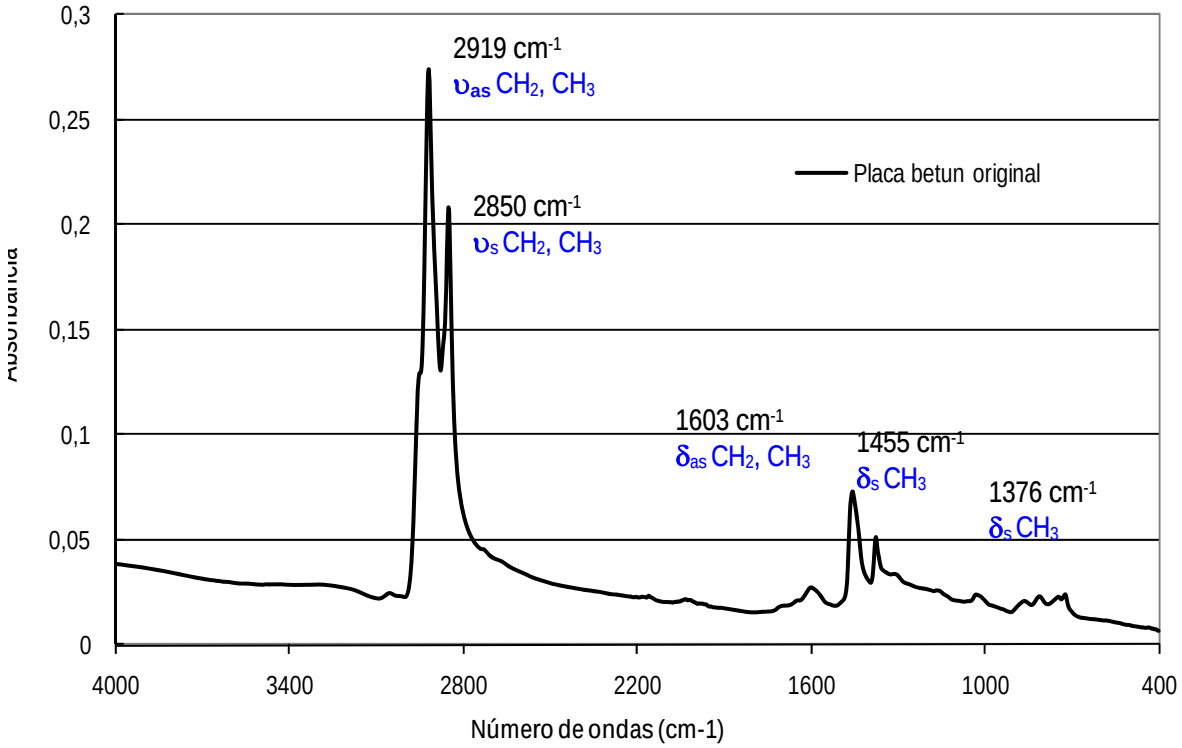


Figura 3. Espectro FTIR de una muestra de betún convencional.

En el espectro del betún envejecido se observan bandas diferentes a las encontradas para el betún que no ha sido irradiado con UV. En primer lugar aparecen las bandas correspondientes a los enlaces O-H a aproximadamente a 3230 y 3070 cm^{-1} y se incrementa la banda centrada a 1712 cm^{-1}, que se asigna a la vibración de enlace del grupo carbonilo, probablemente cetonas debido a la ausencia de bandas en la zona de 3000 cm^{-1}. Asimismo se observa la aparición de numerosas bandas entre 1300-1000 cm-1 que se asocian al enlace C-O (3). Además, en la muestra de betún envejecida aparece una pequeña banda debida a la presencia de sulfóxidos en la muestra a 1039 cm^{-1}.

A más bajos números de onda aparecen las pequeñas bandas características de los enlaces C-H de los anillos aromáticos. En la tabla 1 se recogen las bandas y la asignación de los enlaces C-H de los anillos aromáticos.

Banda (cm^{-1})	Asignación
671	6 átomos de H adyacentes
820-720	5 átomos de H adyacentes (monosustituidos)
790-720	4 átomos de H adyacentes (orto-sustituidos)
830-750	3 átomos de H adyacentes (meta y 1,2,3-trisustituidos)
880-780	2 átomos de H adyacentes (para y 1,2,3,4-tetrasustituidos)
935-810	1 átomo de H adyacentes (meta y 1,2,3,5 y 1,2,3,4,5-tetra y pentasustituido)

Tabla 1. Bandas de asignación de los enlaces de vibración de los enlaces C-H de los anillos aromáticos fuera de los planos.

En el envejecimiento del betún se observa una importante desaparición de las bandas debidas a los CH, la aparición de compuestos oxigenados (ha habido una oxidación de compuestos) y la disminución de aromáticos (las bandas más pequeñas). Comparando los espectros de una muestra de betún nueva y otra envejecida durante 90 horas con una radiación UV alta (figura 5), se pueden apreciar grandes diferencias en las bandas en las que identifican compuestos oxidados como se ha comentado anteriormente. Además, parece intuirse una disminución en la cantidad de compuestos aromáticos que también estaría provocada por la acción de la radiación UV.

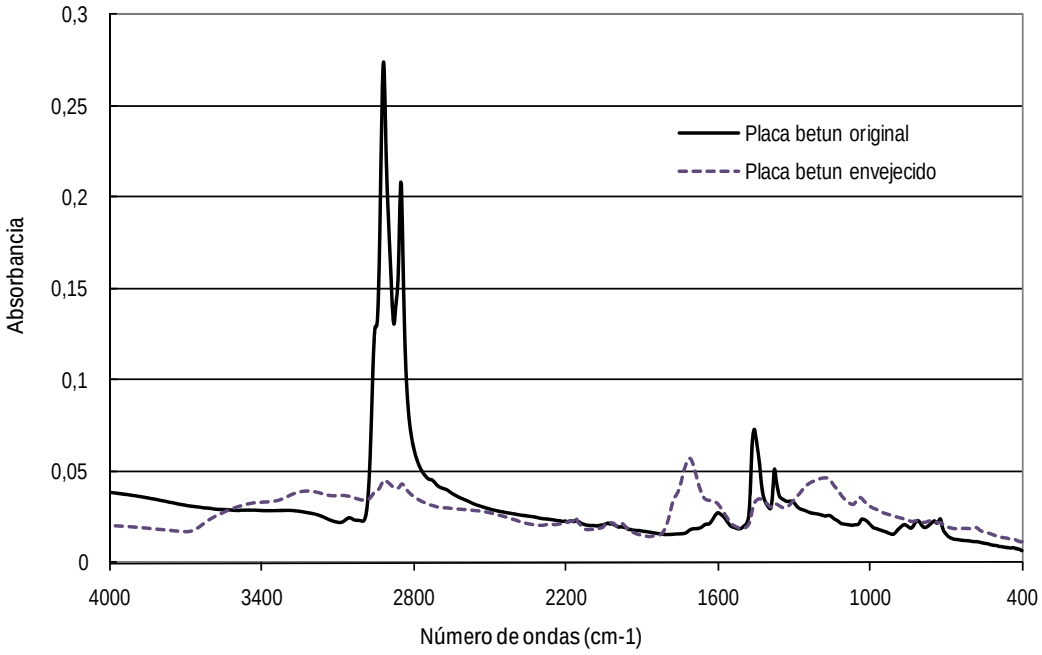


Figura 5. Comparación de los espectros de una muestra de betún nuevo y otra envejecido con radiación UV durante 90 h.

9. EFECTOS DE LA RADIACIÓN UV EN EL BETÚN CON DIFERENTES MODIFICADORES

9.1 EVOLUCIÓN DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA

El estudio que se ha realizado es simplemente cualitativo. Para estudiar el efecto de la radiación UV sobre los diferentes betunes modificados se sometieron las placas FRASS suministras por REPSOL a un envejecimiento mediante radiación ultravioleta de intensidad de 1mW/cm^2, durante 2, 4, 8, 12, 31 y 53 horas. En este estudio se centró en el análisis de las vibraciones con mayor interés que son las debidas a las vibraciones de los enlaces C-H, C=O y S=O. Las regiones de IR de mayor importancia en el proceso de envejecimiento de un betún son las siguientes:

- ✓ 1750-1650 cm^{-1} (área de los carbonilos)
- ✓ 1625-1560 cm^{-1} (área de aromáticos)
- ✓ 1050-950 cm^{-1} (área de sulfóxidos)

El presente trabajo constituye un estudio puramente discriminatorio entre distintas alternativas de betunes y aditivos, en aras del establecimiento de un protocolo de evaluación del mecanismo de envejecimiento por fotodegradación. En ningún momento simula las condiciones reales de puesta en servicio de las mezclas, cuestión que hará necesario un trabajo posterior.

En las figuras 6-13 se han representan los espectros de IR de las muestras envejecidas con radiación UV a tiempos diferentes. En la tabla 2 se resumen los modos de vibración de los enlaces que se han estudiado en este apartado (2-5).

Modos de vibración	Pico (cm^{-1})
C-H enlace simétrico en CH_3	2954
C-H enlace en el plano en CH_2	2926
C-H enlace fuera del plano en CH_2	2854
C-H deformación simétrica en CH_3	1376
C-H deformación asimétrica en CH_2 y CH_3	1456

	1605
C=C enlace en aromáticos	
Grupo funcional	1600
✓ *Amida*	1590, 1600
✓ *Cetona*	1590, 1600
✓ *amida*	1600
✓ *Carboxílico*	1605
✓ *Pirrol*	1590, 1605
✓ *Eter*	1580, 1600
✓ *Fenol*	1600
✓ *Aromáticos Condensados*	
	1698, 1704
C=O enlace en carbonilos/ carboxílicos	
Grupo funcional	1696
✓ *Amida*	1675
✓ *Cetona*	1740
✓ *Ester*	1707, 1750
✓ *Carboxílico (sim y asim)*	1660
✓ *Aldehido*	
S=O enlaces en sulfóxidos	1032

Tabla 2. Asignación de los modos de vibración de los enlaces C-H, C=O y S=O.

Se ha aplicado el mismo protocolo de envejecimiento a distintas muestras de betún: betunes base de diferente origen y composición química, betunes modificados con polímeros y polvo de neumáticos fuera de uso y betunes aditivados. La codificación de las diferentes muestras se recoge en la tabla 3.

Descripción	Codificación Muestra
50/70 (1) BB1_Betún Base asfáltico	**BB1**
50/70 (2) BB2_Betún Base aromático	**BB2**
BMP (1) Betún modificado con elastómeros a partir de BB1	**BMP1**
BMP (2) Betún modificado con elastómeros a partir de BB2	**BMP2**
BC 35/50 Betún mejorado con caucho NFU, a partir de BB2	**BC**
BB2 + 5% de Negro de Carbono	**CB**
BB2 + 5% BHT (antioxidante)	**BHT**
BB2 + 5% SEP (sepiolita)	**SEP**

Tabla 3. Nomenclatura de muestras

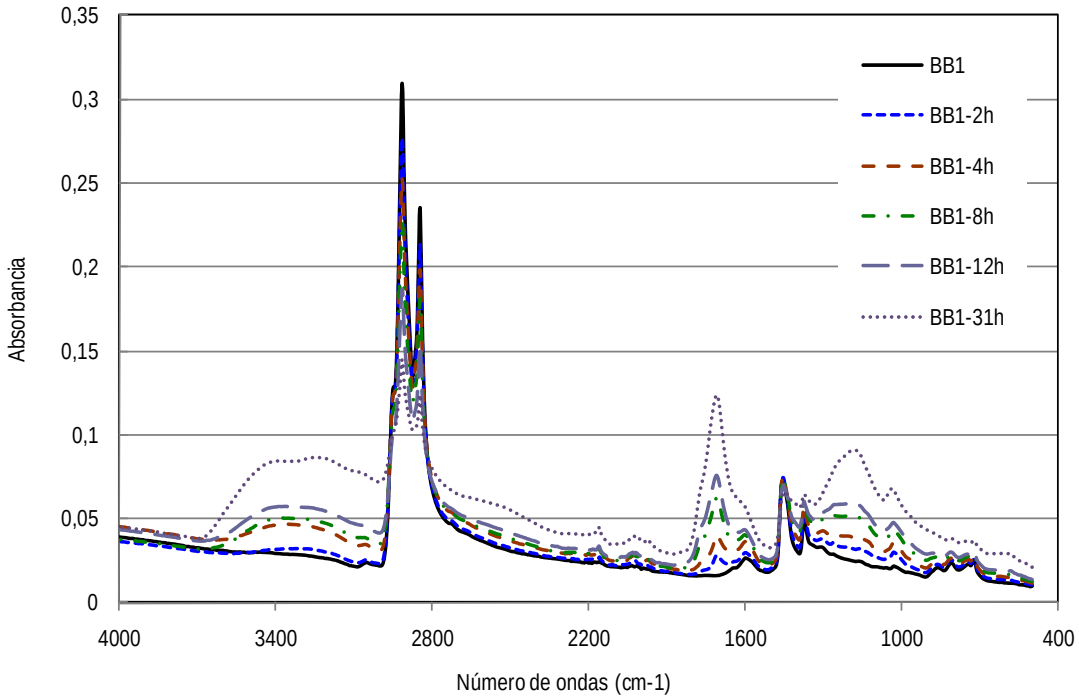


Figura 6. Comparación de los espectros IR de la muestra de betún BB1 original y envejecida durante 2, 4, 8, 12 y 31h con radiación UV (1mW/cm^2).

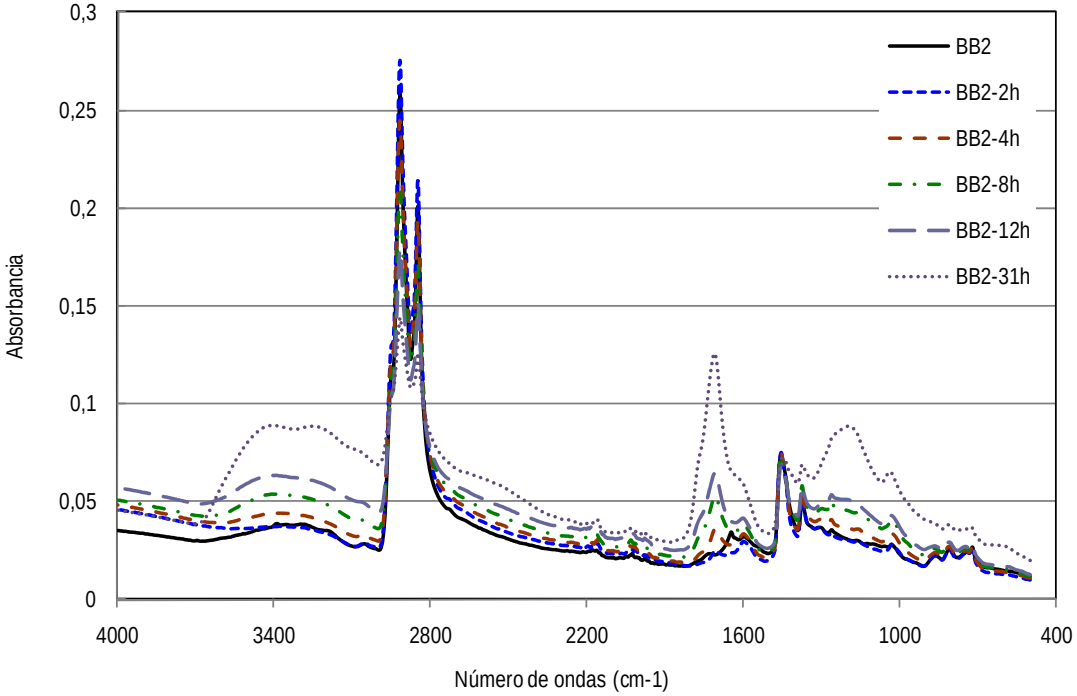


Figura 7. Comparación de los espectros IR de la muestra de betún BB2 original y envejecida durante 2, 4, 8, 12 y 31h con radiación UV (1mW/cm^2).

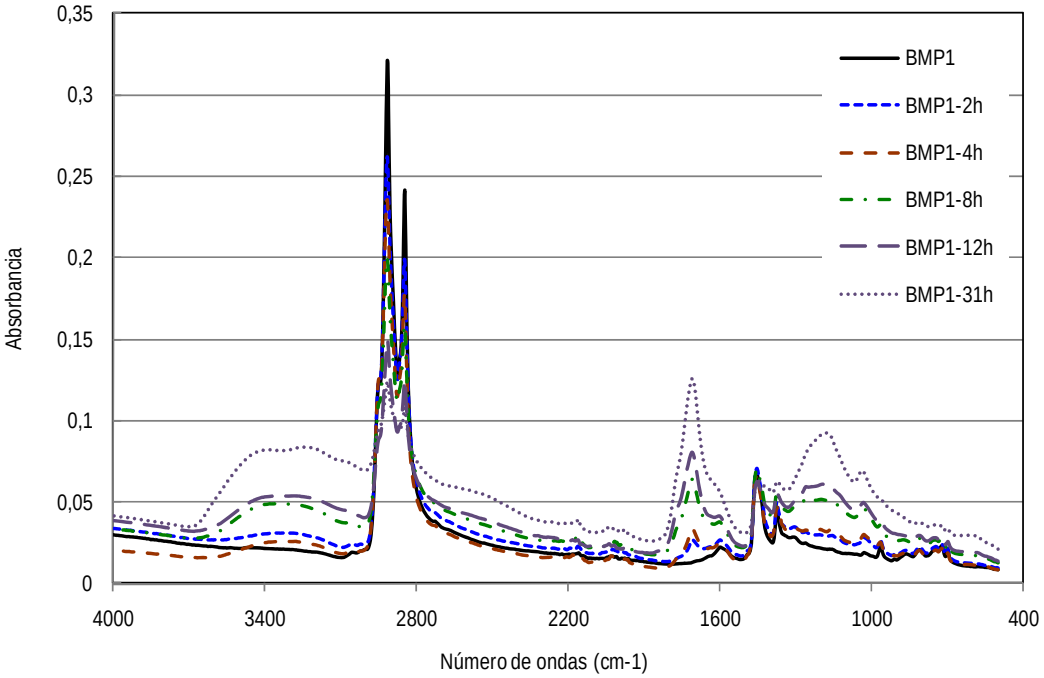


Figura 8. Comparación de los espectros IR de la muestra de betún BMP1 original y envejecida durante 2, 4, 8, 12 y 31h con radiación UV (1mW/cm^2).

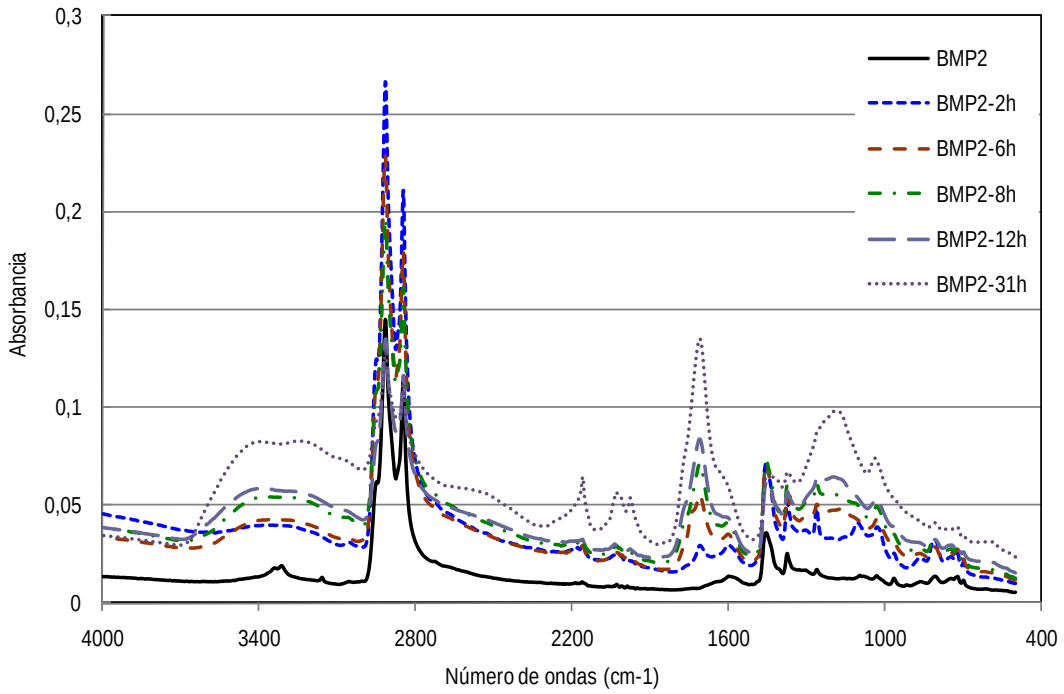


Figura 9. Comparación de los espectros IR de la muestra de betún BMP2 original y envejecida durante 2, 4, 8, 12 y 31h con radiación UV (1mW/cm^2).

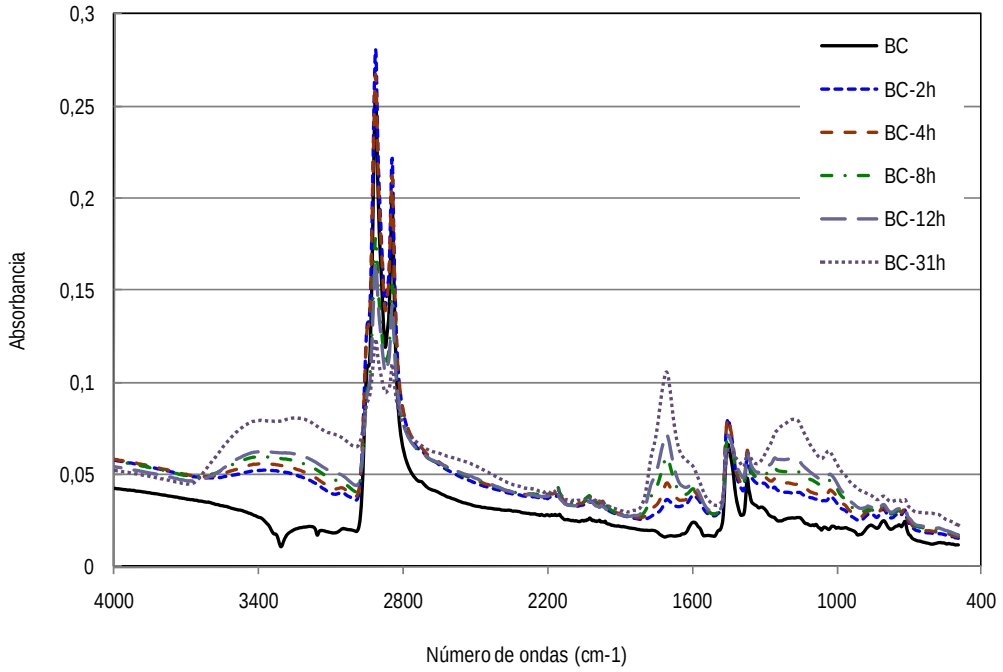


Figura 10. Comparación de los espectros IR de la muestra de betún BC original y envejecida durante 2, 4, 8, 12 y 31h con radiación UV (1mW/cm^2).

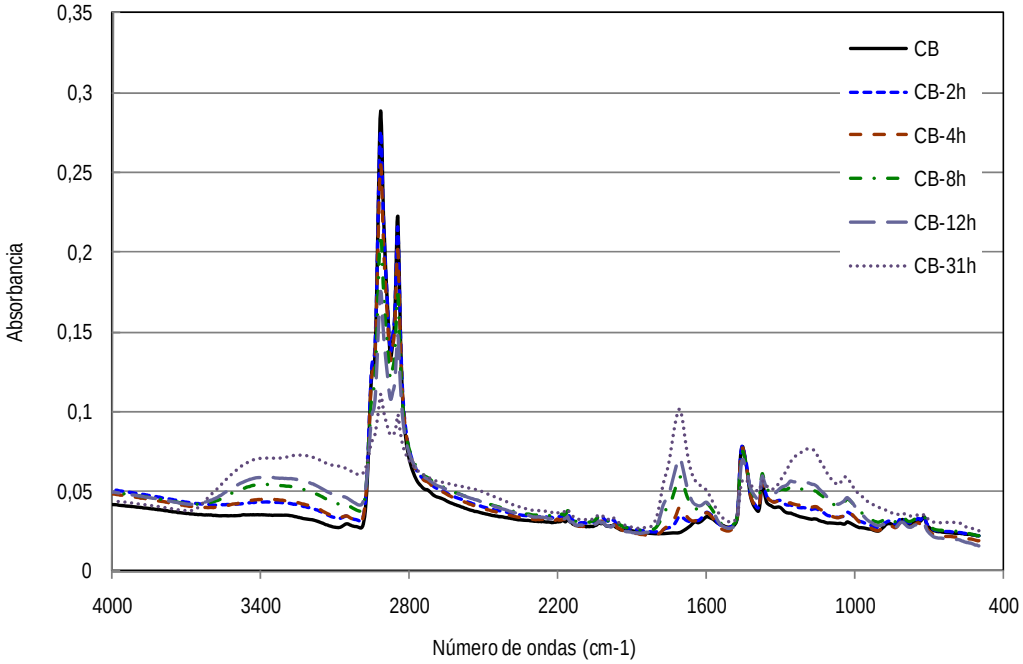


Figura 11. Comparación de los espectros IR de la muestra de betún CB original y envejecida durante 2, 4, 8, 12 y 31h con radiación UV (1mW/cm^2).

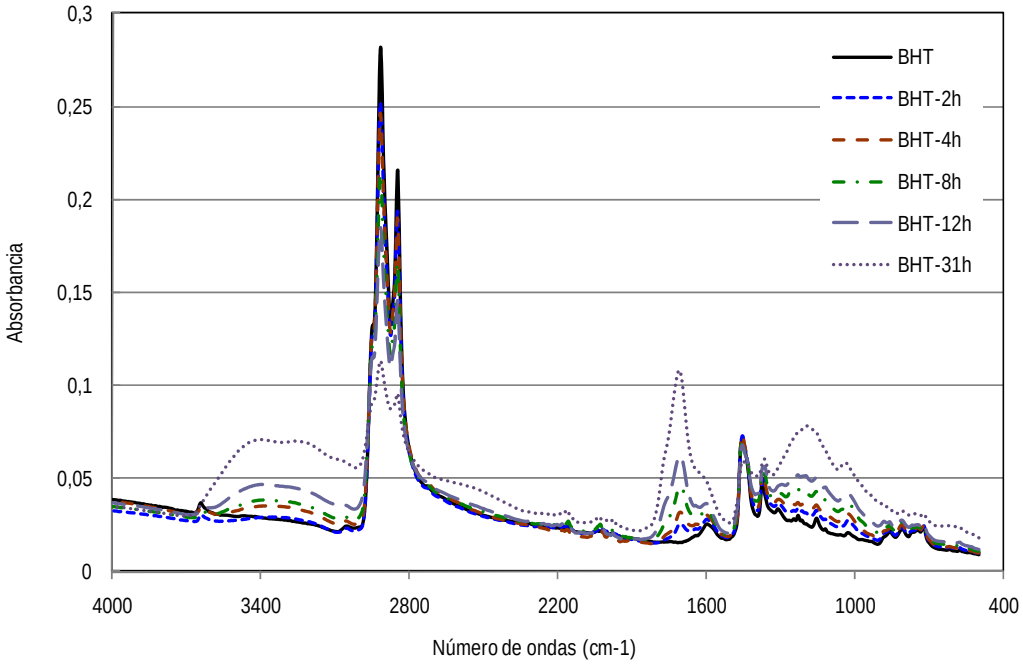


Figura 12. Comparación de los espectros IR de la muestra de betún BHT original y envejecida durante 2, 4, 8, 12 y 31h con radiación UV (1mW/cm^2).

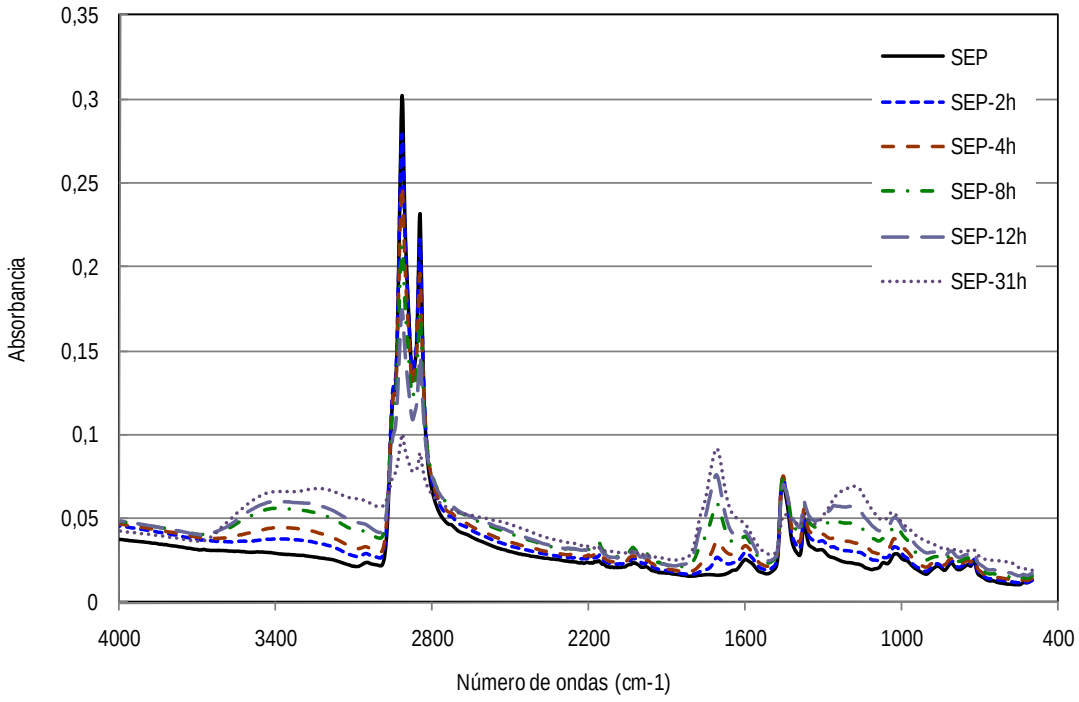


Figura 13. Comparación de los espectros IR de la muestra de betún SEP original y envejecida durante 2, 4, 8, 12 y 31h con radiación UV (1mW/cm^2).

Se ha tomado como referencia final de ensayos de envejecimiento la medida de 31 h debido principalmente a que a partir de este tiempo la señal que se registra en el ATR es muy baja, ya que las muestras, sobre el soporte que se realiza los ensayos, se vuelven muy rígidas y secas y por tanto no se consigue buen contacto con la punta de diamante del ATR para llevar a cabo la medida.

De acuerdo con los cambios químicos registrados en los espectros FTIR, se constata que el origen del betún de partida tiene influencia en la resistencia a la degradación por radiación UV, según los espectros de las muestras BB1 y BB2. El aumento en grupos carbonilos, que es una medida indiscutible del avance de las reacciones de oxidación, se produce en parte por la oxidación de naftenos presentes en las fracciones aromáticas y resinosas de los betunes (12), por lo que diferentes composiciones químicas del betún van a tener diferente comportamiento ante la degradación por UV. Los betunes con un carácter más asfáltico y menos aromático son los que presentan mayor resistencia al envejecimiento por radiación.

La modificación con polímeros no parece producir una mejora en los betunes ante esta fuerte radiación, según observamos en los espectros de BMP1 y BMP2. Sin embargo, sí se observa una ligera mejoría en el caso de betún mejorado con caucho, muestra denominada BC. Para entender esta mejora, se ha fabricado a partir del betún BB2, que es el que mayor degradación sufre, una dispersión de

negro de carbono al 5% (muestra CB). Aunque en los betunes mejorados el contenido neto en negro de carbono sería inferior (el negro de carbono está presente en el caucho NFU en un contenido en torno al 25-30%), se ha fijado esta cantidad para poder detectar cambios en los productos de oxidación. En efecto, se observa una mejoría, en tanto en cuanto tras 31 horas de exposición los picos de carbonilo, sulfóxido y determinados grupos –CH, suben en menor medida.

De igual manera se han dispersado en el mismo betún BB2, un 5% de un aditivo antioxidante y un aditivo de origen inorgánico. En el primer caso, de los dos tipos de antioxidantes comúnmente empleados en betunes, se ha elegido el BHT, cuya actividad es implementada mediante la donación de un electrón o átomo de hidrógeno a un derivado radicalario (free-radical scavenger). De esta forma, mediante la reacción con los radicales libres se puede ralentizar la velocidad de auto-oxidación. El otro tipo de antioxidantes (llamados secundarios) previenen la iniciación de las reacciones de oxidación, aunque tienen menos efecto en la oxidación de betunes. Efectivamente, se observa una velocidad de aumento de los picos significativos menor para el caso de betún con antioxidante. En el segundo caso, se ha añadido un aditivo inorgánico, tipo sepiolita. En bibliografía se han descrito las propiedades anti-oxidativas de los aditivos tipo montmorillionita, por un efecto puramente de impedimento geométrico o estérico ante la permeabilidad de oxígeno a través del material en estudio (14). Así, se ha dispersado un 5% de sepiolita modificada (muestra SEP), e igualmente, se observa una ligera mejoría respecto al betún base BB2, a las 31 horas de exposición.

10.EVOLUCIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS

El material fue sometido al ensayo de fragilidad Fraass con el fin de detectar los cambios físicos a baja temperatura que se producen en los betunes tras el envejecimiento por radiación UV, cuyos efectos van a estar asociados principalmente a un endurecimiento del material. Para cada producto se realizaron tres placas, tanto antes del envejecimiento, como tras el proceso con radiación.

En la tabla 4, se presentan los valores de punto de fragilidad Fraass de los materiales estudiados, antes y después del envejecimiento con radiación UV ($1mW/cm^2$ tras 31h).

MUESTRA	*MUESTRA FRESCA*	*MUESTRA OXIDADA U.V*
BB1	-12	-10
BB2	-14	-8
BMP1	-27	-24
BMP2	-24	-22
BC	-13	-12
CB	-10	-8
BHT	-14	-13
SEP	-16	-12

Tabla 4. Punto de fragilidad Fraass, ºC

Se vuelve a constatar que el origen de los betunes tiene una gran influencia sobre la evolución de la estructura de los mismos ante la radiación UV. Así, BB2 evoluciona volviéndose más frágil, desde -14ºC hasta -8ºC, mientras que BB1 sufre un aumento en el punto de fragilidad de sólo 2ºC.

Los betunes modificados con polímeros presentan poca variación de la temperatura de fragilidad, apreciándose en mayor medida el grado de protección UV que ejerce dicho polímero sobre BB2. El caso de betún modificado con caucho procedente de NFU presenta un excelente comportamiento, a pesar de haber constatado que químicamente el betún evoluciona. Cuando el betún es aditivado con negro de carbono también se obtiene una diferencia en el punto de fragilidad relativamente pequeña, pudiendo entonces contribuir el negro de carbono al buen comportamiento anti-envejecimiento del betún-caucho.

Para el caso del antioxidante, BHT, efectivamente también se obtiene un buen comportamiento que corrobora los buenos datos obtenidos con FTIR. Sin embargo, el caso de la dispersión de sepiolita proporciona mejores datos en la evolución de especies químicas que en la evolución de propiedades físicas a baja temperatura. Estos resultados pueden estar asociados al hecho de que la protección proporcionada por la misma se debe principalmente a un impedimento geométrico y a que la sepiolita desarrolla en el betún una estructura tridimensional bajo cizalla de mezclado. Dicha estructura pudiera verse afectada superficialmente bajo una fuerte radiación UV y, sin embargo, seguir inhibiendo la evolución de especies en la matriz de betún.

Por lo tanto, el protocolo expuesto en el presente trabajo constituye una buena técnica discriminatoria y de evaluación semi-cuantitativa de la resistencia de los betunes, y por tanto de las capas superiores de las capas de rodadura del firme, ante la foto-degradación producida por la radiación UV.

11. BIBLIOGRAFÍA

1.- A. Martínez, N. Martín, A. Gómez y A. Páez. Betunes Asfálticos: materiales muy utilizados y poco conocidos químicamente. Anales de la Real Sociedad Española de Química. Segunda Época Octubre-Diciembre 2003. p 43-52.

2.- M. G. Mothé, L. F. M. Leite y C. G. Mothé. Thermal characterization of asphalt mixtures by TG/DTG, DTA and FTIR. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. Vol. 93, 105-109, 2008.

3.- M.N. Siddiqui, M.F. Alli. Studies on the aging behavior of the Arabian asphalts. Fuel 78, 1005–101, 1999

4.- J. D. McLean y P. K. Kilpatrick. Comparison of Precipitation and Extrography in the Fractionation of Crude Oil Residues. Energy and Fuels 11, 570-585, 1997.

5.- S. P. Wu, G. J. Zhu, G. Liu y L. Pang. Laboratory research on thermal behavior and characterization of the ultraviolet aged asphalt binder. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. Vol. 95, 595-599, 2009.

6.- C. Ouyang et al. Polymer Degradation and Stability 91 (2006) 795-804

7.- F. Durrieu et al. The influence of UV aging of a Styrene/Butadiene/Styrene modified bitumen: Comparison between laboratory and on site aging. Fuel 86 (2007) 1446–1451

8.- V. Mouillet et al. Ageing by UV radiation of an elastomer modified bitumen Fuel 87 (2008) 2408–2419

9.- J. Lamontagne et al. Application de la microspectroscopie infrarouge à l'étude du vieilissement de bitumes-polymères. BLPC 240 (2002) 4434: 15-26

10.- V.F.C. Lins, M.F.A.S. Araújo, M.I. Yoshida, V.P. Ferraz, D.M. Andrada, F.S. Lameiras. Photodegradation of hot-mix asphalt. Fuel 87 (2008) 3254–3261

11.- Siddiqui MN, Ali MF. Investigations of chemical transformations by NMR and GPC during the laboratory aging of Arabian asphalt. Fuel 1999;78:1407–16.

12.-Tan Yi-Qiu, Wang Jia-Ni, Feng Zhong-Liang and Zhou Xing-Ye. INFLUENCE AND MECHANISM OF ULTRAVIOLET AGING ON BITUMEN PERFORMANCE. Proceedings of the 26th Southern African Transport Conference (SATC 2007)

13.- Jian-Ying Yu, Peng-Cheng Feng, Heng-Long Zhang, Shao-Peng Wu. Effect of organo-montmorillonite on aging properties of asphalt. Construction and Building Materials 23 (2009) 2636–2640

14.- Bell, C.A. 1989. Summary report on ageing of asphalt-aggregate systems, SHRP-A/IR-9-004, Strategic Highway Research Program (National Research Council, Washington, D.C.).

15.- Vallerga, B. A., Monismith C. L. and Granthem K. 1957. A study of some factors influencing the weathering of paving asphalt. Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, 26, 126–150.

16.-Bocci, M. and Cerni, G. 2000. The ultraviolet radiation in short- and long-term aging bitumen. Proc. 2nd Euroasphalt & Eurobitume congress, session 1: performance testing and especifications for binder and mixtures Barcelona, pp 49-58.

17.- Afanasieva, N. & Cifuentes, M. 2002. Efecto de la radiación solar en el proceso de envejecimiento en los asfaltos colombianos. 4tas Jornadas Internacionales del Asfalto, Popayán.

18.- Hugo, F. and Kennedy, T.W. 1985. Surface cracking of asphalt mixtures in Southern Africa, Proc. Assn. Asphalt Paving Technol. 54, 454–501.

19.- Kemp, G.R. and Prodoehl, N.H. 1981. A comparison of field and laboratory environments on asphalt durability2, Proc. Assn. Asphalt Paving technol. 50. 492-537.

20.- Tia, M, B.E. Ruth, C.T. Charai, J.M. Shiau, D Richardson, and J. Williams 1988. Investigation of Original and Inservice Asphalt Properties for the Development of Improved Specifications- Final Phase of testing and Analysis, Final Report, Engineering and Industrial Experiment Station, University of Florida, Gainesville, FL.

21.-Del Pozo, J., Querol, N., Páez, A., García, J.L., Felipo, J., Potti, J.J.: Determinación del envejecimiento de los betunes empleados en reciclado en caliente con muy altas tasas. XV Congreso Ibero- Latino Americano del Asfalto. Lisboa 23-27 noviembre 200.

FISURACIÓN DESCENDENTE: CAUSAS Y DESARROLLO DEL ENSAYO WRC COMO MÉTODO PREDICTIVO.

AUTORES

Juan Gallego (UPC), Jacinto García Santiago (Sacyr) y Patricia Díaz (Sacyr)

1. PAVIMENTOS DE LARGA DURACIÓN.

La base conceptual de los pavimentos de larga duración es la idea de que para firmes adecuadamente construidos y con cierta capacidad portante, no lleguen a desarrollarse deterioros estructurales significativos que afecten a las capas inferiores. Por el contrario, se ha observado experimentalmente cómo en estos firmes los deterioros están localizados en la superficie, de forma que si son corregidos en tiempo y forma oportunos, su vida útil puede prolongarse considerablemente.

Esta estructura multicapa de larga duración, para la que se prevén vidas de servicio de hasta 50 años o más, acentúa los requerimientos tradicionales para la capa de rodadura de los firmes ya que la misión de proporcionar una superficie de rodadura cómoda y segura ha de mantenerse a lo largo de un período de tiempo superior a 50 años mediando para ello el menor número posible de operaciones de fresado y reposición de dicha rodadura.

La estructura del paquete de mezclas bituminosas en un firme de larga duración es es del tipo de la reflejada en la Figura 1. En dicha estructura el papel de cada una de las capas de mezcla bituminosa, lejos de contribuir simplemente a una capacidad portante global del firme, se especializa para prevenir uno o varios tipos de deterioro frecuentes en esa capa. Ello permite optimizar el uso de los materiales así como el diseño del firme.

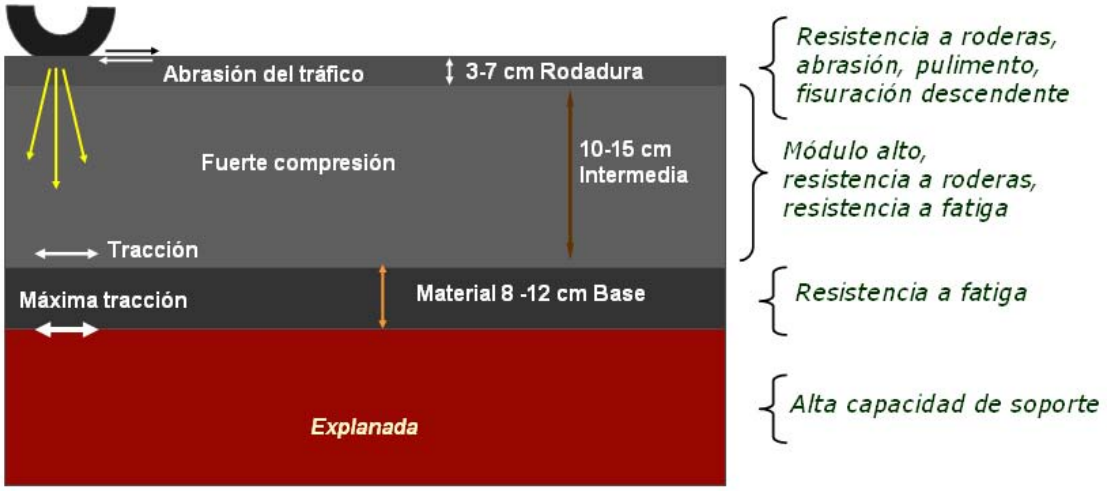


Figura1. Esquema estructural de un Firme de Larga Duración

La capacidad estructural es aportada por las capas de base e intermedia. Así, es necesario disponer materiales con un módulo elevado; en la capa de base es necesario además que el material tenga una elevada resistencia a la fatiga, ya que será la capa del firme sometida a las tracciones más altas bajo el paso de las cargas del tráfico. Todo ello, claro está, ha de ir estar apoyado en un cimiento con alta capacidad de soporte.

Por su parte, la capa de rodadura en un pavimento de larga duración es la única que será remplazada varias veces a lo largo de la vida del firme. A sus funciones y características se dedica el siguiente apartado.

2. PECULIARIDADES DE LA CAPA DE RODADURA EN LOS PAVIMENTOS DE LARGA DURACIÓN.

La capa de rodadura, además de resistir las cargas del tráfico sin deformarse, habrá de tener una elevada resistencia a la disgregación para resistir los esfuerzos, tanto verticales como horizontales, ejercidos por los neumáticos de los vehículos. Por ello es importante el uso de dotaciones elevadas de betún modificado.

El uso de altas dotaciones de betún supone además el aumento del espesor de la película bituminosa que recubre los áridos, lo que mejorará su resistencia al envejecimiento.

Son especialmente recomendables las mezclas discontinuas tipo BBTM o SMA ya que además de posibilitar un contenido elevado de betún sin riesgo de deformaciones plásticas, disponen de un fuerte esqueleto mineral, proporcionan la macrotextura necesaria para evitar problemas de resistencia al deslizamiento y mejoran las condiciones de conducción en caso de lluvia.

Respecto al árido grueso de la capa de rodadura, además de garantizar una adecuada adherencia con el ligante que evite su desprendimiento (para esta capa resultan fundamentales los ensayos de sensibilidad frente al agua), es necesario que tenga la resistencia mecánica suficiente para evitar su fractura (reducido coeficiente de los Ángeles) así como una buena resistencia al pulimento (elevado C.P.A.) que garantice una resistencia al deslizamiento duradera en el tiempo.

Por lo que se refiere a su vida útil, varias operaciones de fresado y reposición (las menos posibles) deben sumar una vida por encima de 50 años, periodo de vida que se baraja cuando se habla de firmes de larga duración.

A día de hoy el objetivo alcanzable para la capa de rodadura, y así lo han sido establecido diferentes instituciones, es de una vida útil de la capa de alrededor de 15 años. Como dato ilustrativo, cabe citar que entre los requisitos que la Asphalt Pavement Alliance establece para poder optar a los premios anuales "Perpetual Pavements", está el de que la carretera a galardonar no haya requerido reasfaltados durante períodos de al menos 13 años.

3. ESTRATEGIAS DE CONSERVACIÓN ASOCIADAS A LOS PAVIMENTOS DE LARGA DURACIÓN.

Como se ha dicho, el proyecto de firmes de larga duración persigue conseguir firmes que se mantengan en servicio durante varias décadas, requiriendo únicamente el reemplazamiento de la capa de rodadura, la más superficial de todas, cuando deterioros como el pulimento del árido obliguen a su sustitución (cada 12-15 años).

Este espaciamiento entre operaciones de conservación sólo sería posible cuando otros deterioros prematuros no hayan afectado al firme, concretamente a su capa de rodadura.

Por lo tanto, una vez diseñado y construido el firme de larga duración, serán necesarios unas estrategias de conservación que no permitan que la capa de rodadura llegue a una situación crítica, que obligaría a remplazarla antes de lo previsto, o de otra forma, haría peligrar la siguiente capa de mezcla bituminosa.

Entre los fallos prematuros que puede sufrir un pavimento bituminoso está la fisuración descendente (top-down cracking). Consiste en la aparición y desarrollo de fisuras en la capa superior, no resultando del reflejo de fisuras de las capas inferiores. Se trata de un fenómeno al que se le ha dado importancia sólo recientemente aunque parece, a tenor de los primeros estudios e informes, más frecuente de lo que cabría esperar.

4. LOCALIZACIÓN Y CAUSAS DE LA FISURACIÓN DESCENDENTE.

Numerosas investigaciones han constatado que en firmes con una elevada capacidad portante, por encima de cierto espesor de mezcla bituminosa, no suelen presentarse deterioros de tipo estructural, quedando éstos localizados en la capa de

rodadura, normalmente en forma de deformaciones permanentes y fisuración superficial.

La deformación permanente, sus causas, ensayos de laboratorio idóneos para su estudio y prevención, han sido objeto de investigación durante décadas. Sin embargo ha sido sólo durante la última década cuando se ha puesto de manifiesto que muchas de las fisuras que tienen nuestras carreteras eran superficiales, se habían iniciado en la superficie y posteriormente habían progresado hacia las capas inferiores.

Este apartado se dedica a clarificar un poco la naturaleza y origen de esta tipología recientemente descubierta: la fisuración descendente.

4.1 PATRONES MÁS HABITUALES DE LA FISURACIÓN DESCENDENTE.

La morfología más frecuente de las fisuras descendentes se caracteriza por la disposición longitudinal, normalmente ininterrumpida durante varias decenas de metros. Puede tratarse de una fisura única, o bien dos e incluso tres fisuras longitudinales, siempre con cierta sinuosidad, y localizadas transversalmente a unos quince o veinte centímetros de la rodada, y en menos ocasiones coincidiendo con ella.

A la hora de localizar una de estas fisuras es preciso distinguirla de una junta de extendido defectuosa, o de fisuras reflejadas desde capas inferiores: ambas tipologías aunque longitudinales suelen ser más rectilíneas, y las reflejadas además suelen coexistir con fisuras transversales de la misma patología. En último término, el verdadero origen de la fisura puede cotejarse mediante la extracción de un testigo del pavimento y su examen visual. La Fig. 2 muestra dos tramos afectados por fisuración descendente, y los testigos que pusieron de manifiesto que se trataba de una patología de este tipo. Como se ve en la figura, el proceso de deterioro va creando unas ramificaciones transversales.

Fig. 2. Fisuración en la C-681 (Girona). Detalle de los testigos.

4.2 CAUSAS DE LA FISURACIÓN DESCENDENTE.

En la aparición de un fenómeno de fisuración descendente intervienen factores relacionados con el estado de tensiones y deformaciones del firme (sus características estructurales, las cargas de tráfico y los cambios de temperatura especialmente) y con las características intrínsecas del material con que se ha fabricado la capa de rodadura.

Entre las causas extrínsecas al material están las cargas de tráfico. La rueda de los vehículos pesado causa un momento negativo a sus lados, con deformaciones que pueden ser importantes, y tensiones que serán mayores cuanto mayor sea el módulo de la mezcla bituminosa.

Igualmente, las disminuciones de temperatura ocasionan una contracción de la capa de rodadura, que combinada con el tráfico o por sí misma puede conducir a su fisuración. Este fenómeno dependerá no tanto del incremento de su módulo como del coeficiente de dilatación térmica que tenga el material.

Entre los factores intrínsecos están las propiedades de la mezcla bituminosa: su módulo, la susceptibilidad de su módulo con la temperatura, su resistencia a tracción, su resistencia al cizallamiento, a la flexión, sus características de fragilidad, etc.

4.2.1 Estudio analítico

En los estudios desarrollados durante el Proyecto Fénix se analizaron diversas secciones de firme, simulando la variación de varios factores intrínsecos y extrínsecos. Las conclusiones del estudio fueron, resumidamente las siguientes:

- En el firme la mayor deformación con frecuencia no es la de tracción en el fondo de capa, sino que en muchos casos la deformación de Von Misses en la capa es mayor, del orden de dos o tres veces la que corresponde a la deformación unitaria que se traduce en un millón de ciclos de carga en la ley de fatiga del material. Este hecho pone de manifiesto la necesidad de no reducir el estudio de fisuración a la tracción que se produce horizontalmente bajo la rueda, sino que la acción conjunta de las temperaturas y el tráfico pueden dar lugar a estados tensionales más complejos, en los que los parámetros críticos pueden no ser los esperados.

- De los casos que se analizaron –incluyendo gradientes térmicos, envejecimiento de la mezcla bituminosa, presión de inflado de los neumáticos anormalmente alta o baja y debilitación de la mezcla por efecto de segregación granulométrica- los más críticos, es decir, aquéllos en los que la deformación de Von Misses era demasiado alta, fueron los supuestos de envejecimiento de la capa de de rodadura y los de segregación granulométrica de dicha capa.

- Se observó que las deformaciones críticas se producían en muchos casos a diez o veinte centímetros del centro de la rueda de carga (Fig. 3), lo que justificaría el hecho de que en muchos casos se haya observado que la fisura longitudinal no coincide con la rodada, sino que está un poco desplazada lateralmente, a unos veinte centímetros de la misma.

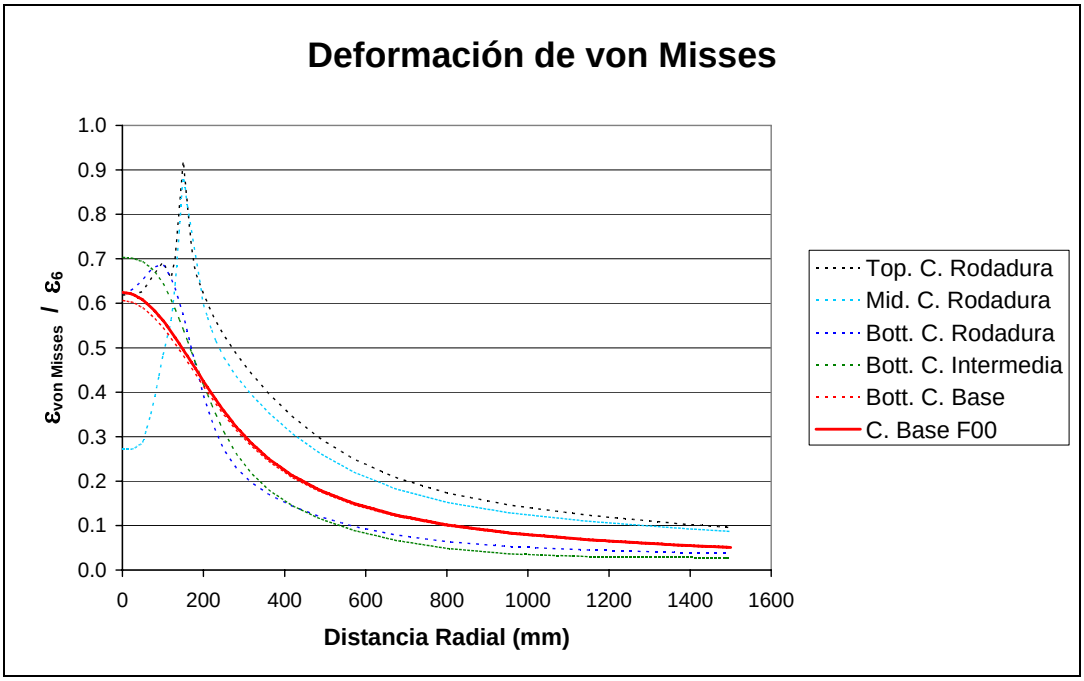


Figura 3. Deformaciones de Von Misses en un pavimento con rodadura envejecida.

4.2.2 Estudio de casos a escala real.

También durante el Proyecto Fénix se llevó a cabo el estudio de varios tramos de carreteras en servicio afectados por fisuración descendente. Se procuró encontrar en el mismo itinerario vial pares de tramos homogéneos, en cuanto a tráfico, características del firme, condiciones de drenaje, etc., que distasen entre sí unos hectómetros y a pesar de ello estuviesen en un caso afectado por fisuración descendente y en el otro no. Se realizaron mediciones en el pavimento y, sobre todo, extracción de testigos y su posterior análisis, intentando aislar los factores que habían determinado la aparición de fisuración descendente en un tramo mientras que en el otro no.

Las conclusiones fueron claras, en el sentido de que **deben evitarse**:

- **Segregaciones granulométricas** durante la fabricación y puesta en obra. Estas segregaciones generan zonas de la capa (rodadura o intermedia) de menor módulo, conduciendo a deformaciones que pueden ser excesivas y conducir a la rotura del material. La segregación también puede suponer que en el fondo de capa se localizan más gruesos, conduciendo a una situación también vulnerable frente a la fisuración descendente

- **Desviaciones granulométricas**, particularmente hacia el lado grueso del huso granulométrico. Las desviaciones hacia el lado grueso de una fórmula de trabajo parecen potenciar la aparición de fisuración descendente, por lo que deben evitarse

- **El envejecimiento del ligante** suele estar presente cuando se produce fisuración descendente. Por lo tanto deberán utilizarse ligantes resistentes al envejecimiento. Son recomendables ligantes modificados con polímeros, y particularmente los modificados con caucho de neumáticos; en cualquier caso debería comprobarse previamente su resistencia al envejecimiento. Adicionalmente al beneficio de la resistencia al envejecimiento, los ligantes modificados, por su mayor viscosidad, contribuyen a controlar los fenómenos de segregación granulométrica.

5. FISURACIÓN DESCENDENTE Y FISURACIÓN POR FATIGA: ENSAYOS DE LABORATORIO MÁS ADECUADOS.

5.1 CONCEPCIÓN TRADICIONAL EN EL DISEÑO DE FIRMES.

Tradicionalmente el firme se ha modelizado como una estructura multicapa con el fin de obtener la respuesta, en términos de tensiones y/o deformaciones, bajo las solicitaciones del tráfico. Esta respuesta estructural es posteriormente utilizada para predecir el deterioro del firme, usualmente mediante la utilización de leyes de fatiga.

En la actualidad existen numerosos programas comerciales de tipo multicapa elástico lineal; BISAR, ALIZE o ELSYM5 son sólo algunos ejemplos. La mayoría de estos programas difieren en la interfaz para la entrada y salida de datos, siendo el núcleo del programa, el proceso matemático, similar en todos ellos y basado en la solución desarrollada por Burmister en 1943.

Respecto al segundo paso fundamental de un proceso de diseño analítico, el modelo de deterioro, la mayoría de los métodos lo resuelven mediante la aplicación de leyes de fatiga. Una ley de fatiga es una relación matemática entre cierta magnitud de respuesta estructural y el número de repeticiones permitidas hasta el agotamiento. Normalmente se consideran sólo tres mecanismos de deterioro:

- Fisuración por fatiga de la mezcla bituminosa considerada mediante la deformación horizontal por alargamiento o tracción en el fondo de la capa de mezcla bituminosa.

- Acumulación de deformaciones permanentes considerada mediante la deformación vertical de compresión en la coronación de la explanada.

- Fisuración por fatiga del material tratado con cemento considerada a partir de la tensión horizontal de tracción en el fondo de la capa de dicho material.

Las leyes de fatiga de los materiales se obtienen en laboratorio mediante ensayos de caracterización dinámica; es decir, **se precisa algún tipo de ensayo del material para, a partir de los parámetros obtenidos en esa caracterización empírica, aplicar unos modelos de predicción**.

5.2 CONSIDERACIÓN DE LA FISURACIÓN DESCENDENTE EN EL DISEÑO DE FIRMES.

Al ser relativamente reciente el interés que ha despertado la fisuración descendente, la mayoría de los modelos de predicción no tienen en cuenta este modo de fallo. Una excepción es el modelo Mechanistic-Empirical Design Guide for new and rehabilitated pavement structures, MEPDG (NCHRP Project 1-37A), que trata este tipo de fisuración de modo similar a la fisuración ascendente. El comportamiento esperado depende –según este modelo- de la deformación unitaria de tracción (ε) en la superficie del pavimento y del módulo de la mezcla, medido en un ensayo de compresión.

No obstante parece necesario un ensayo específico para evaluar cualquier mezcla en función de sus característica frente a la fisuración descendente, caracterizándola con algún parámetro cuantitativo (tal in como ocurre con los ensayos dinámicos para caracterizar la resistencia a fatiga). Se trataría de determinar algún tipo de resistencia mecánica que sirva, sola o junto a otros parámetros, para estimar la propensión de una mezcla bituminosa a la fisuración descendente, y por tanto poder incluirla dentro de un modelo de predicción.

De acuerdo con el estudio numérico que se ha realizado a lo largo del proyecto Fénix, las deformaciones horizontales no son las más críticas, sino que éstas son superadas por las de Von Misses.

Por ello el ensayo a que se sometiese la mezcla debería, en principio, someterla a un sistema complejo de acciones cuyo estado tensodeformacional no sea el estado que se produce en ensayos simples de tracción directa o indirecta, sino que considere otros esfuerzos, como la flexión o el cizallamiento que se dan realmente en el pavimento.

En el próximo apartado se expone un aparato de ensayo que podría cumplir estos requisitos.

6. EL ENSAYO WHEEL REFLECTIVE CRACKING (WRC)

El ensayo Wheel Reflective Cracking surgió en el año 2006 para estudiar un fenómeno distinto al de la fisuración descendente: la fisuración reflejada o ascendente. Para describir el aparato y su fundamento y los esfuerzos que introducen en las probetas, se comenzará por recordar brevemente el fenómeno de la fisuración ascendente o reflejada.

6.1 LA FISURACIÓN ASCENDENTE O REFLEJADA

El fenómeno de reflexión de grietas consiste en que las juntas y grietas de un pavimento, generalmente de hormigón o de capas tratadas con cemento, se propagan a través de la capa asfáltica superior hasta aparecer en su superficie, causando la entrada de agua, acelerando el deterioro del firme e incrementando con ello los costes de mantenimiento.

Las grietas de reflexión aparecen sobre las juntas y grietas existentes en la capa subyacente debido a los movimientos horizontales y verticales de sus bordes.

Las cargas de tráfico producen en las juntas y grietas dos tipos de movimientos que causan en la capa bituminosa superior tensiones cortantes (Figuras 4a y 4c) y tensiones por flexión (Figura 4b).

Por otro lado, los descensos de temperatura causan la retracción térmica de las capas fisuradas o con juntas constructivas, produciendo la abertura progresiva de juntas y fisuras, lo que genera tensiones de tracción en la capa bituminosa (Figura 4d). Simultáneamente los descensos de las temperaturas incrementa la rigidez de la mezcla bituminosa, disminuyendo su capacidad de deformación y haciéndola más vulnerable a la reflexión de las grietas.

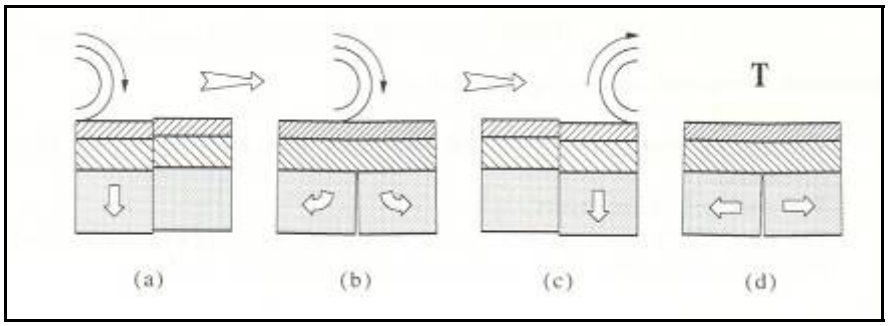


Figura 4. Movimientos en juntas y grietas de pavimentos.

En el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Madrid, España, se ha desarrollado un equipo que simula simultáneamente los principales factores y mecanismos de deterioro que son causa de la reflexión de grietas. Permite estudiar el comportamiento del conjunto capa fisurada - capa superior bituminosa.

6.2 EL EQUIPO WRC.

El equipo utilizado para la prueba WRC se desarrolló a partir de la máquina del ensayo Wheel Tracking (Pista de laboratorio, NLT-173). La prueba WRC se realiza con un nuevo utillaje para este equipo. La Figura 5 muestra el equipo WRC montado sobre la máquina Wheel Tracking, mientras que la Figura 5 presenta un esquema general del mismo.

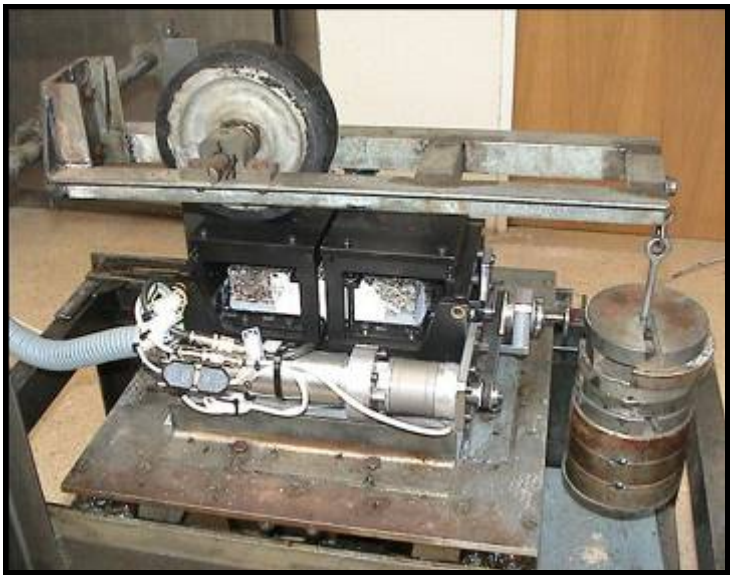


Figura 5. WRC colocado en la máquina de Pista de Laboratorio.

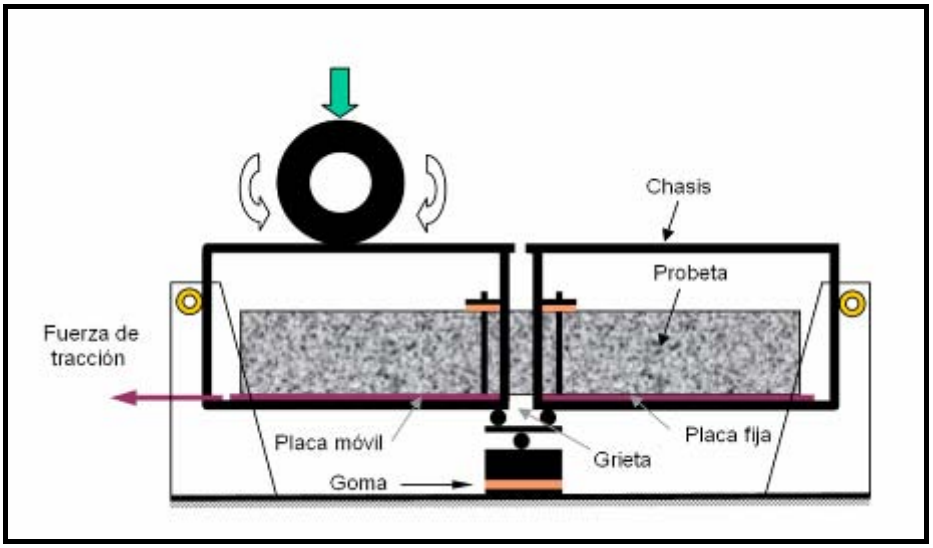


Figura 6. Representación esquemática del ensayo WRC.

En la Tabla 1 se presentan los factores que causan la reflexión de grietas, se describen los mecanismos de deterioro mediante los cuales los factores actúan y se mencionan los sistemas utilizados para simular dichos mecanismos en la prueba WRC.

Tabla 1. Factores y mecanismos de deterioro simulados en el WRC.

FACTOR	MECANISMOS DE DETERIORO	EFECTO EN LA MEZCLA ASFALTICA	SISTEMAS DE SIMULACIÓN EN LA PRUEBA WRC
Temperaturas bajas	Incrementan la rigidez de la mezcla asfáltica.	Disminución de la capacidad de deformación.	Se ejecuta el ensayo a temperatura de 5 °C.
Descensos de temperatura. (Figura 1d)	Incrementan la abertura de juntas y grietas.	- Deformaciones horizontales de tracción - Tensiones horizontales de tracción.	- Tracción horizontal aplicada con micromotor. - Sistema de placas deslizantes. (Figuras 6 y 7a)
Flexión de la estructura del pavimento. (Figura 1b).	Flexión del recrecimiento bituminoso.	- Deformaciones horizontales de tracción. - Tensiones horizontales de tracción.	- Flexión generada por un apoyo de goma. (Figuras 6 y 8)
	Abertura de grietas y juntas.	- Deformaciones horizontales de tracción. - tensiones horizontales de tracción.	- Tracción horizontal - Sistema de placas deslizantes. (Figuras 6 y 7a)
Movimiento vertical relativo	Efectos cortantes en la probeta.	- Deformaciones cortantes. - Tensiones cortantes.	- Balancín. (Figuras 6 y 8)

La prueba WRC simula en forma simultánea los mecanismos de deterioro generados por los principales factores que causan la reflexión de grietas.

- Para simular el factor “bajas temperaturas” el ensayo se realiza a una temperatura de 5 °C.

- El factor “descenso de temperaturas” y la consiguiente abertura de las grietas y juntas por efecto térmico se simula mediante el micromotor que actúa sobre uno de los dos chasis, provisto de una placa deslizante que permite el movimiento longitudinal de media probeta, al tiempo que la otra media probeta está fijada en el otro chasis, sin posibilidad de desplazarse longitudinalmente. La adherencia que existe en un pavimento a escala real entre la capa bituminosa y la capa subyacente se consigue mediante un adhesivo epoxídico que une la probeta a las placas, una de ellas fija y la otra deslizante, y separadas entre sí inicialmente una distancia de 10 mm para simular una junta o grieta a partir de la cual se genera el fenómeno de la reflexión, (Figura 7a). Estas placas se fijan a los chasis mediante tornillos; durante la ejecución de la prueba, como se ha dicho, una de las placas permanece fija, mientras que la otra se sujeta con un sistema que le impide los desplazamientos verticales y horizontales transversales –con respecto al eje de la probeta-, pero le permite desplazarse horizontalmente en el sentido longitudinal, siguiendo el movimiento impuesto por el micromotor (Figura 7b); es la placa que se ha denominado placa deslizante.

- El factor “flexión” se simula a través de la deformación vertical de una goma colocada debajo del balancín, sobre el que se apoyan los extremos centrales de ambos chasis; la deformación de la goma es mayor cuanto más centrada esté la rueda de carga en el aparato WCR, lo que ocurre durante unos instantes cada vez que la rueda se desplaza en ambos sentidos sobre la grieta.

-

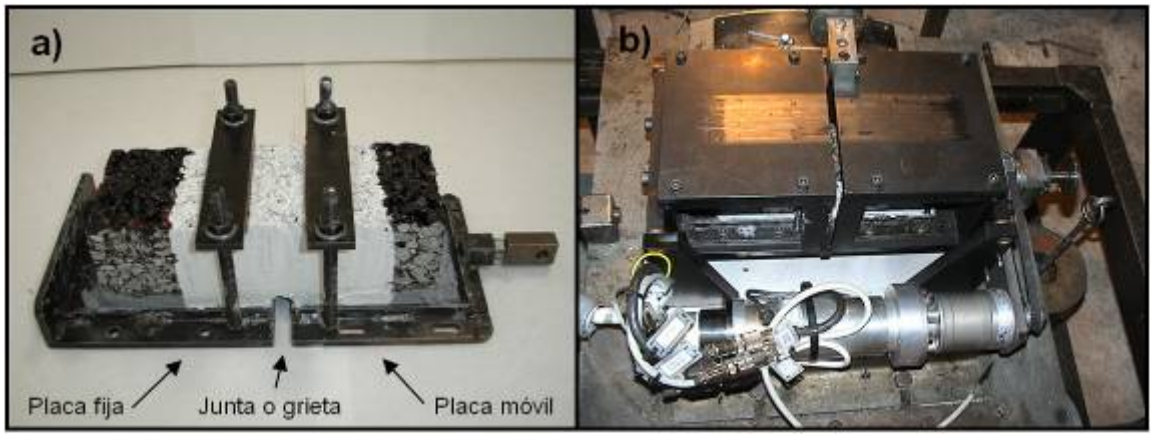


Figura 7. Probeta en placas de adherencia (a);

micromotor para aplicar tracción horizontal (b).

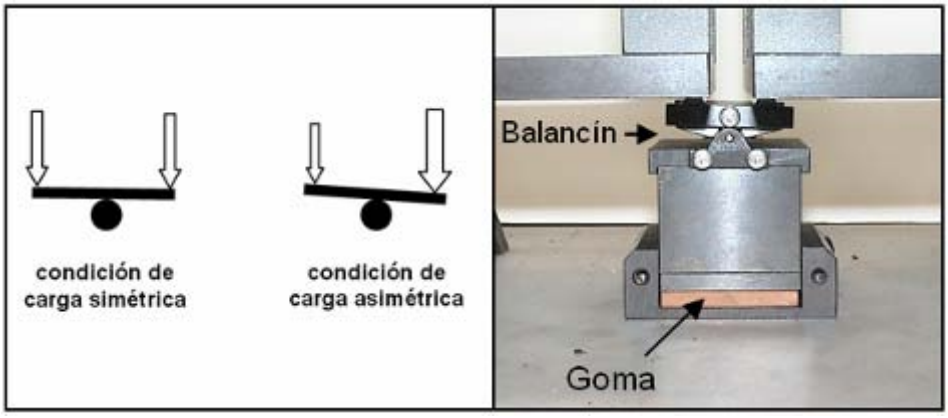


Figura 8. Mecanismo que simula el movimiento vertical relativo y la deflexión.

- El factor "movimiento vertical relativo" que se presenta entre los bordes de las juntas y grietas -debido al paso de las cargas de tráfico- generando tensiones cortantes en la capa bituminosa (Figuras 4a y 4c) se simula en el equipo WRC mediante un balancín, en cuyos lados se apoyan los chasis que soportan la probeta (Figuras 6 y 8). El paso de la rueda de carga sobre los chasis genera en el balancín dos condiciones de carga: una simétrica y otra asimétrica, (Figura 8). Cuando la posición de la carga es simétrica respecto de la grieta los desplazamientos verticales de los bordes -teóricamente- son iguales presentándose deflexión pero no movimiento vertical relativo entre los bordes de la junta o grieta. Cuando la carga es asimétrica respecto al centro de la grieta se genera un movimiento hacia abajo en el lado más cargado del balancín y como consecuencia un movimiento hacia arriba en el lado con menos carga; al desplazarse la rueda al otro lado de la grieta se invierte el sentido del movimiento vertical. De esta forma se simula el factor "movimiento vertical relativo" entre los dos lados de la junta o grieta.

6.3 TIPO DE PROBETAS UTILIZADAS EN EL APARATO WRC.

Las probetas utilizadas en la prueba WRC se obtienen cortando probetas de 30x30 cm que se fabrican –en términos generales- de la misma forma que las probetas utilizadas en el ensayo Wheel Tracking. La Figura 9a presenta la sección transversal de una probeta de la prueba WRC; está compuesta por una base de mezcla asfáltica de 1 cm de espesor, fabricada con una granulometría fina normalizada. Posteriormente se coloca la capa de mezcla asfáltica, mediando entre ellas un riego de adherencia con emulsión ECR-2m. La Figura 9b presenta dos probetas utilizadas en la prueba WRC, una sin geotextil y otra con geotextil. El equipo WRC permite ensayar espesores de mezcla asfálticas entre 4 y 8 cm e

incluir geotextiles u otros sistemas antirreflexión que se desee colocar en la carretera.

Se ha comprobado que es suficiente el ensayo de 3 probetas para la caracterización de un material. Por tanto se ensayan 3 probetas de la misma mezcla bituminosa

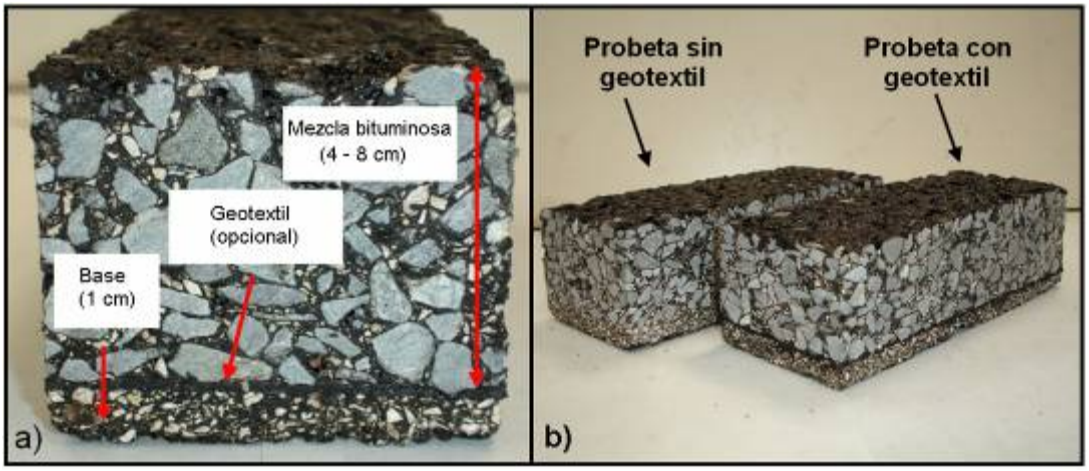


Figura 9. Características de la probeta utilizada en la prueba WRC.

6.4 PARÁMETROS DE ENSAYO EN LA PRUEBA WRC

Fijada la temperatura de ensayo y el tipo de probeta, los parámetros a definir en cada ensayo que se realice son la velocidad de abertura de la fisura, que se controla actuando sobre el micromotor mediante el software de control, y la deflexión máxima, que puede variarse estableciendo diferentes espesores en el taco de goma (figura 8).

6.5 DESARROLLO DE LA PRUEBA Y CRITERIO DE FINALIZACIÓN.

Una vez instalada la probeta y endurecido el producto adhesivo con que se sujeta a la placa fija y a la deslizante, y a una temperatura de 5ºC, el software pone el sistema a cero y da comienzo la prueba con el paso cíclico, en movimientos de vaivén, a razón de 43 pasadas por minuto. A partir de ese momento comienza el deterioro en la sección central de la probeta a causa de los mecanismos que generan el fenómeno de la reflexión de grietas, descritos anteriormente.

Durante el ensayo se realiza una toma de datos en continuo, registrándose el número de ciclos de carga y el movimiento vertical relativo entre “bordes de fisura”, es decir, entre los extremos centrales de ambos chasis. Este último dato, el movimiento vertical relativo entre bordes, es el que determina el final de la prueba, habiéndose establecido un valor máximo de 0,2 mm. En realidad el criterio de fallo está relacionado con la pérdida de transmisión de carga entre bordes de fisura, lo que evidencia la rotura de la capa de mezcla bituminosa.

El resultado de la prueba es el tiempo transcurrido (minutos) hasta el final de la prueba.

7. ADAPTACIÓN DEL ENSAYO WRC AL ESTUDIO DE LA FISURACIÓN DESCENDENTE.

Como se expresó en el apartado 5, sería conveniente disponer de un ensayo específico para evaluar las capas de mezclas bituminosas frente al problema de la fisuración descendente.

El aparato WRC se concibió orientado a las tensiones y deformaciones que aparecen en el problema de la fisuración ascendente o reflejada; sin embargo, los esfuerzos que aparecen en la fisuración descendente son similares: tracción, flexión (negativa cuando la fisura se produce junto a las rodadas y no en ellas) y cizallamiento, aunque éste último esfuerzo de menor intensidad que en el caso de una fisura reflejada desde las capas inferiores, ya fisuradas.

Por este motivo se decidió aplicar este procedimiento de ensayo, variando tanto la disposición del aparato como la colocación de la probeta. Los cambios que se realizaron fueron los siguientes:

- Se eliminó el balancín, quedando el aparato apoyado en su parte central directamente sobre el apoyo de goma. Se elimina así la condición de asimetría de movimientos verticales impuesta por el balancín, aunque subsiste un cierto efecto cortante, debido a que el apoyo central de los dos chasis es independiente. Este cambio se realizó para considerar que el efecto cortante en el caso de fisuración descendente es menos intenso que en el caso de fisuración ascendente, donde el paso de la rueda de un camión sobre una fisura transversal existente en el pavimento genera un importante esfuerzo cortante

- La probeta de ensayo se obtuvo mediante el adecuado serrado de testigos cilíndricos de diámetro 150 mm, extraídos de los pavimentos en estudio, de modo que su forma final se adaptase al espacio que el aparato WRC tiene dispuesto para la colocación de la probeta (Figuras 10, 11 y 12)

- La probeta en el aparato WRC se colocaba invertida (Fig. 11) respecto a la posición de la capa en el pavimento (bocabajo). Con esto se consigue un efecto de flexión inversa, como la que se produce a los lados de la rodada en el pavimento.

- Dado que estaba previsto estudiar la capa de rodadura de varios pavimentos, y que en algunos de ellos la capa de rodadura apenas tenía 4 cm de espesor, a todas las probetas ensayadas se les practicó un entalladura central (Fig. 12) de profundidad tal que la sección útil de la probeta quedaba en todos los casos con un espesor de 4 cm.

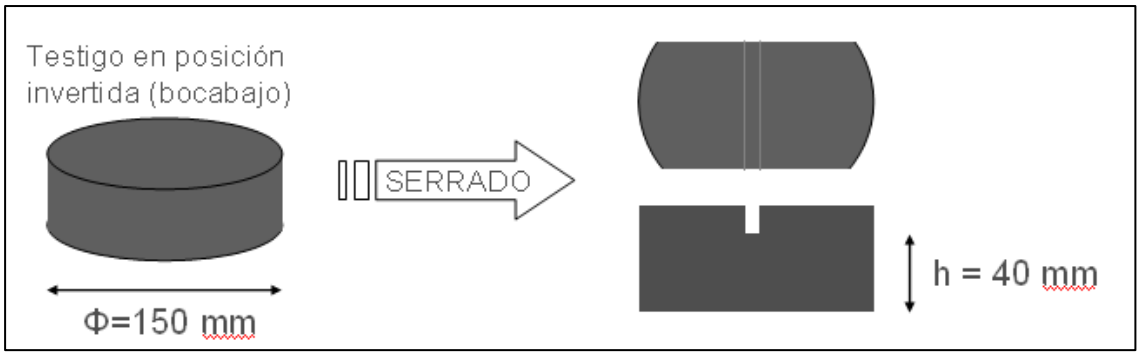


Figura 10. Serrado de un testigo para conseguir una probeta de ensayo WRC.

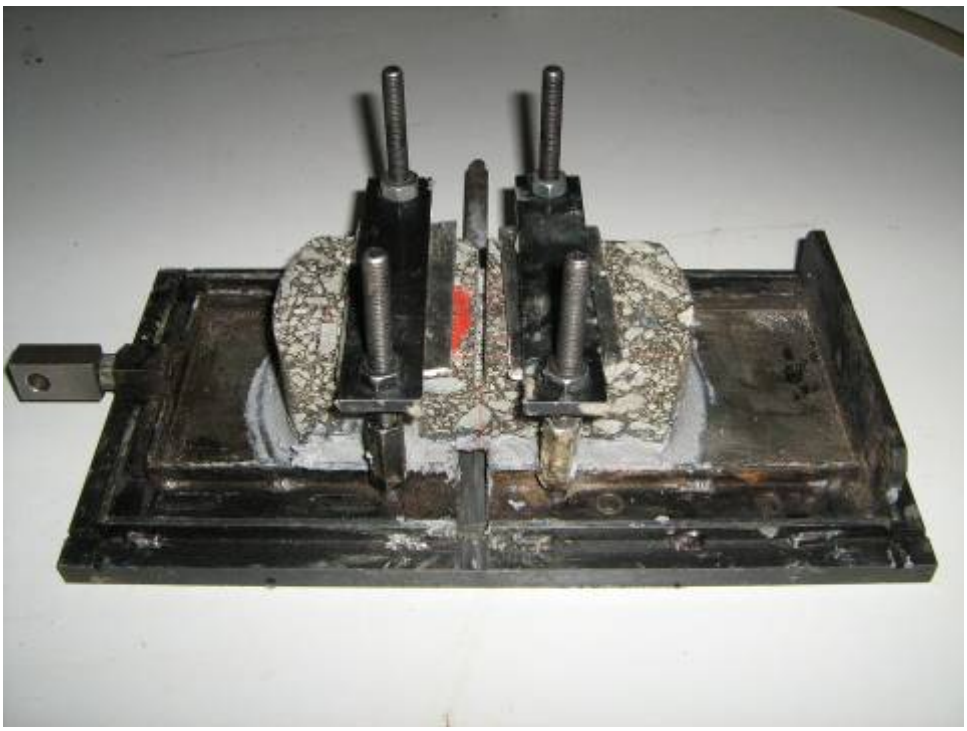


Figura 11. Aspecto de la probeta fijada a las placas

antes de ser instalada en el chasis de ensayo.

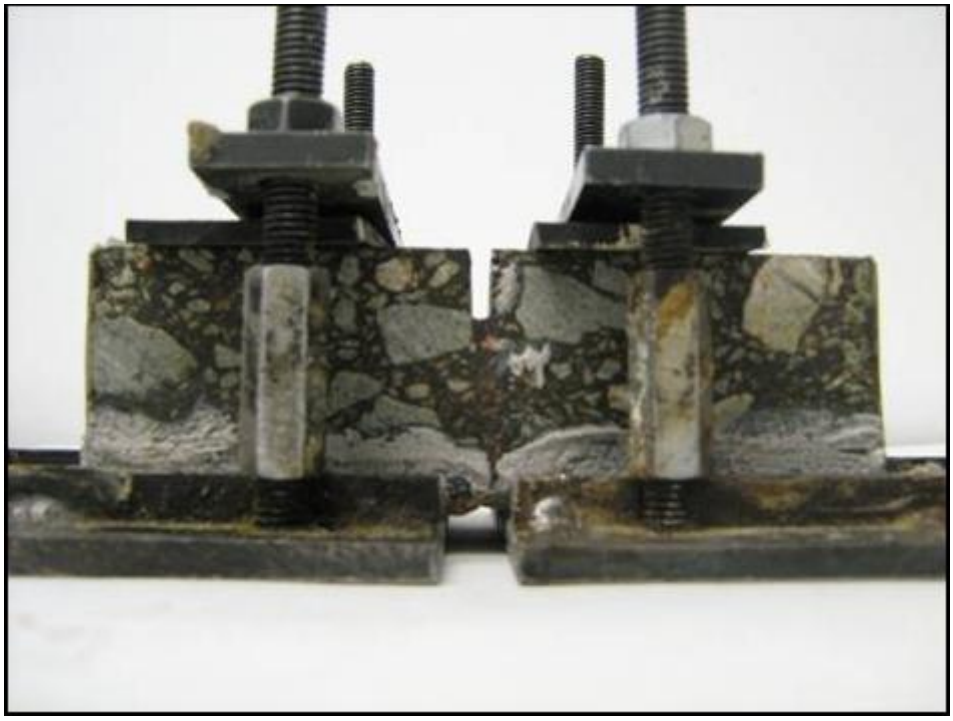


Figura 12. Detalle de la entalladura practicada en la sección central para dejar una sección útil de 4 cm de espesor.

Con los cambios realizados, los esfuerzos aplicados a la probeta en esta modalidad del ensayo fueron de tracción directa, flexión inversa y un moderado cizallamiento.

El ensayo se realizó a 5ºC, como suele ser habitual en el caso de estudios de fisuración ascendente, ya que en estas condiciones la mezcla se encuentra más frágil, y por tanto en condiciones más críticas, que a temperaturas de servicio medias.

8. APLICACIÓN DEL ENSAYO WRC AL ESTUDIO DE CASOS DE FISURACIÓN DESCENDENTE.

Una vez que se definieron las nuevas condiciones de ensayo en el aparato WRC, se procedió a aplicarlo en varios casos reales de fisuración descendente. El más interesante y completo de ellos es el estudio de la fisuración descendente en la carretera CL-602, en la provincia de Valladolid. Se trata de una carretera en la que se detectaron tres tramos sucesivos en los que, a pesar de disponer de la misma sección estructural, el mismo tráfico y el mismo régimen de temperaturas, uno de ellos estaba muy afectado por fisuración descendente, otro sólo moderadamente afectado, y el tercero prácticamente no había sido afectado.

Se extrajeron testigos de pavimento, procurando elegir una zona cercana a las fisuras en superficie, pero no afectadas por ellas, de modo que el testigo de capa

de rodadura estuviese sano, sin fisuras que pudiesen influir en el resultado del ensayo WRC. Se serraron tres probetas de ensayo de la capa de rodadura, a partir de los correspondientes testigos, en cada uno de los tres tramos en estudio.

Sometidas al ensayo WRC, los resultados de duración hasta rotura (minutos) fueron los que presenta la Tabla 2.

Tabla 2. Resistencia en el aparato WRC (minutos)

Testigo nº	Tramo muy afectado	Tramo moderadamente afectado	Tramo poco afectado
1	104	150	198
2	84	165	230
3	88	133	240
Media	**92**	**149**	**223**
σ^2	10,6	16,0	21,9

Según se observa en la Tabla 2, los resultados del ensayo WRC están en plena consonancia con el comportamiento frente a fisuración descendente que tuvieron los tramos a escala real. Se observa que frente a los 92 minutos de media que duró el ensayo de WRC para las probetas del tramo muy afectado, las del tramo moderadamente afectado tardaron en romperse 140 minutos, y las del tramo poco afectado fueron las más resistentes, con un valor medio de 223 minutos.

Por lo tanto parece que el ensayo es capaz de predecir el comportamiento de la mezcla bituminosa a escala real frente a la fisuración descendente.

No obstante conviene aclarar que los resultados obtenidos tienen valor en cuanto a comparación entre los tres tramos estudiados. Sin embargo es difícil establecer un umbral o valor admisible en este tipo de ensayo. Para poder definir dicho valor sería necesaria una investigación más amplia, en la que deberían tenerse en cuenta no sólo el resultado del ensayo en unas condiciones de laboratorio estándar, sino también las características del firme y sobre todo las condiciones climáticas de la carretera a la que se destinaría la mezcla que se estudia en el laboratorio.

En cualquier caso, el ensayo WRC puede servir para comparar mezclas de distintas características, variando la granulometría, el tipo de ligante, los contenidos de ligante, etc., de modo que se optimice el diseño de la mezcla bituminosa frente al problema de la fisuración descendente.

9. CONCLUSIONES.

A modo de resumen podrían establecerse algunas conclusiones, relativas tanto a la fisuración descendente como a la aplicación del ensayo WRC a la evaluación de la resistencia a la fisuración descendente de las mezclas bituminosas:

- La fisuración descendente, caracterizada por iniciarse en la capa de rodadura e ir afectando paulatinamente a las capas inferiores, es un fenómeno bastante frecuente en los firmes asfálticos. Esto se ha podido constatar recientemente en España, en los trabajos de la tarea de Pavimentos de Larga Duración incluida en el Proyecto Fénix. Muchas de las fisuras que se venían atribuyendo a fisuras reflejadas desde capas inferiores, o a la evolución de fenómenos de fatiga, más bien parecen deberse a esta patología. La extracción de testigos y su examen visual permiten, en última instancia, determinar si la fisura se ha originado en la rodadura (fisuración descendente) o en las capas profundas.

- Cuando se pretende obtener un firme de larga duración –de unos 50 años de vida- es fundamental mantener adecuadamente la capa de rodadura: ésta se deberá remplazar cada 12-15 años aproximadamente, pero no antes. Para conseguirlo se deben controlar los deterioros más frecuentes de esta capa: deformaciones plásticas, ataque del agua, y fisuración descendente.

- Las causas de que se produzca fisuración descendente están relacionadas con las cargas de tráfico y el régimen de temperaturas de la carretera. Éste último induce en el pavimento dilataciones y contracciones y además varía el módulo y la fragilidad de las mezclas bituminosas. También está relacionado con características intrínsecas de la mezcla bituminosa, como la eventual segregación del árido y el envejecimiento del ligante.

- Mediante análisis en elementos finitos se ha constatado que las deformaciones de Von Misses pueden ser de mayor magnitud que las deformaciones horizontales de tracción en la mezcla bituminosa. Esto se debe a que el estado tensodeformacional del firme es mucho más complejo que el debido a una dilatación o contracción térmica, combinándose realmente esfuerzos de tracción, flexión e incluso cizallamiento.

- Hasta el momento no existe ningún ensayo de laboratorio creado específicamente para evaluar la resistencia de una mezcla bituminosa a la fisuración descendente.

- El ensayo WRC se concibió en el año 2006 para determinar la resistencia de una mezcla bituminosa o un tratamiento de otro tipo a la reflexión de fisuras desde las capas inferiores.

- Se ha comprobado que introduciendo modificaciones en el procedimiento de ensayo, este test puede evaluar el condición de una mezcla bituminosa frente al problema de la fisuración descendente, estableciendo un ranking de idoneidad al comparar varias mezclas bituminosas entre sí.

- El ensayo WRC podría emplearse para optimización de mezclas bituminosas durante su proceso de diseño: granulometría, tipo y contenido de ligante, etc.

- Son precisos nuevos esfuerzos para determinar el valor de los umbrales admisibles en el resultado de este ensayo, examinando un mayor número de casos de fisuración descendente a escala real.

- En cualquier caso, se precisarían datos del firme y del clima que va a soportar la carretera a la que se destina una mezcla bituminosa para predecir su comportamiento, puesto que para el mismo resultado en el ensayo WRC podrían registrarse problemas de fisuración descendente en unos tipos de pavimentos y climas, mientras que en otros más benignos no sería así. Es decir, la resistencia a la fisuración en el aparato WRC puede uno de los parámetros de un futuro modelo de comportamiento frente a la fisuración descendente, pero se precisarán otros relacionados con el pavimento y el clima.

10. BIBLIOGRAFÍA.

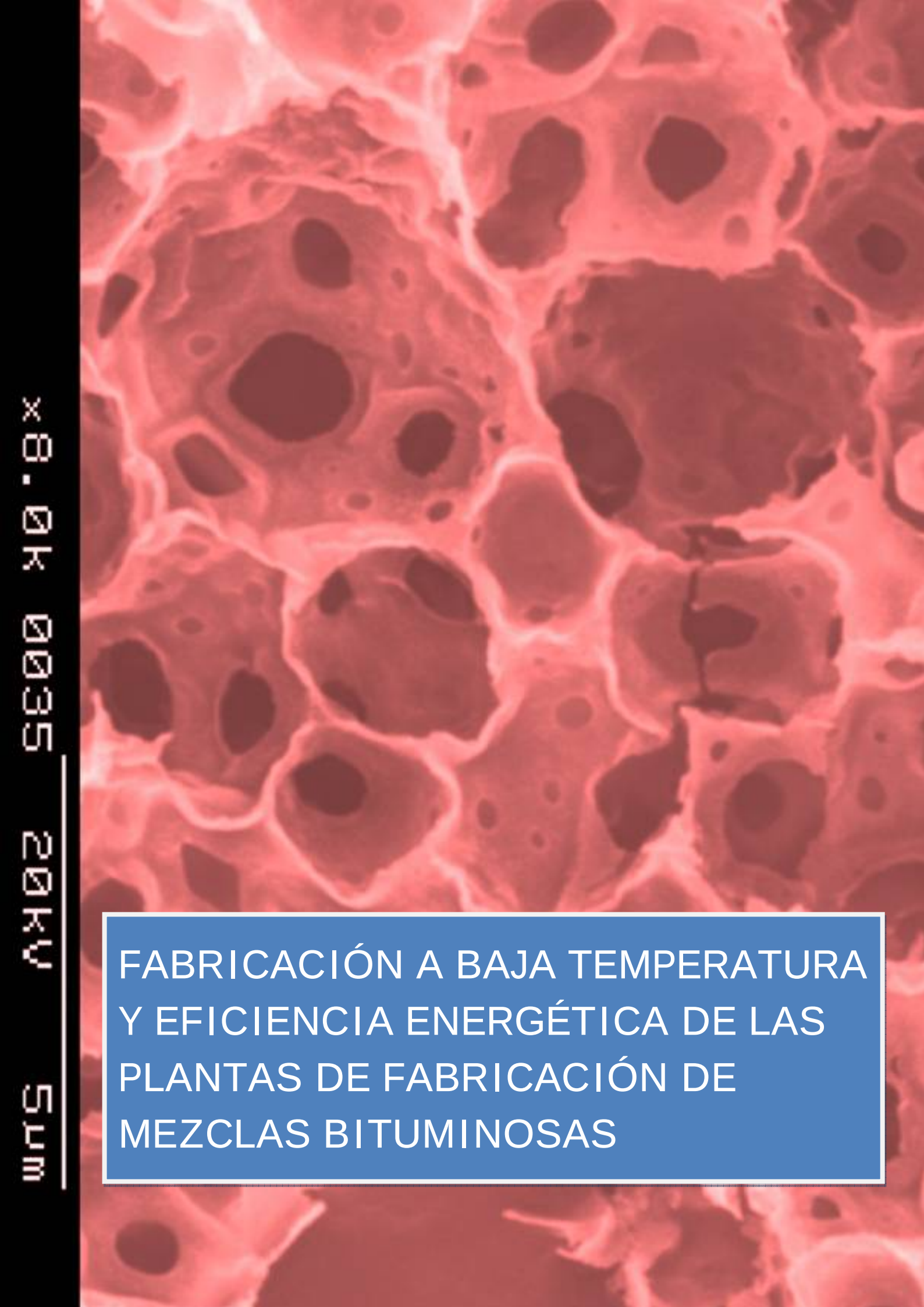
- El material con que se ha elaborado este documento está extraído en su mayoría del Entregable 6.5 de la tarea de Pavimentos de Larga Duración, del Proyecto Fénix, con el título: “Factores determinantes en la aparición de fisuración superficial. Modelos para caracterización y evaluación de mezclas”.

- Por lo que respecta a la concepción, puesta a punto y utilidades del ensayo Wheel Reflective Cracking (WRC) pueden consultarse las siguientes referencias:

  - Prieto, J. (2006) Desarrollo de un nuevo ensayo de laboratorio para medir la eficacia de sistemas antirreflexión de fisuras en capas bituminosas. Tesis Doctoral. Director: Prof. Juan Gallego. Universidad Politécnica de Madrid.

  - Gallego, J., Prieto, J.N. (2006) New Laboratory Equipment for Study of Reflective Cracking in Asphalt Overlays. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. Número: 1970, ISSN 0361-1981

  - Prieto, J.N., Gallego, J., Pérez, I. (2007) Application of the WRC Test for Assessing Geosynthetics in Antirreflective Cracking Systems. Geosynthetics International, Vol 14, nº 5, Thomas Telford Journals. London. ISSN 1072-6349



FABRICACIÓN A BAJA TEMPERATURA Y EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LAS PLANTAS DE FABRICACIÓN DE MEZCLAS BITUMINOSAS

FABRICACIÓN A BAJA TEMPERATURA Y EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LAS PLANTAS DE FABRICACIÓN DE MEZCLAS BITUMINOSAS

ANÁLISIS DEL POTENCIAL ENERGÉTICO Y EXERGÉTICO DE LAS PLANTAS ASFÁLTICAS Y MEDIDAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA.

AUTORES

Diego Peinado (Intrame), José Ramón López (Pavasal), Jesús Felipo (Pavasal), Alberto Moral (CARTIF).

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, las superficies pavimentadas llegan a ser el 45% de todo el terreno en regiones urbanas en los Estados Unidos [1]. A lo largo del mundo, la tasa global de urbanización, y el incremento general de la población están generando una gran demanda de redes de carreteras.

Este nivel de actividad tiene importantes consecuencias en el ámbito de la sostenibilidad. En una reciente revisión realizada sobre 14 publicaciones recientes, Muench [2], se analizan algunos datos sobre los impactos energéticos y medioambientales de la construcción de carreteras, en particular, que la energía empleada durante la construcción de la carretera es aproximadamente igual a la energía utilizada por el tráfico durante la operación de la misma durante 1 o 2 años, y que las emisiones totales de CO_2 durante su construcción varían entre 200 y 600 toneladas por carril y milla.

En la mayor parte de los países, el pavimento de esas carreteras, aeropuertos, y otras áreas con tráfico rodado se viene realizando con mezclas bituminosas en caliente, un material preparado en instalaciones industriales denominadas plantas asfálticas. En estas plantas, el ligante bituminoso producido y transportado en otras instalaciones, es almacenado en grandes tanques y calentado para asegurar su fluidez y una envuelta correcta de los áridos. Durante la fabricación, los áridos almacenados en acopios al descubierto, son transportados hasta el secadero, donde además de ser secados, se calientan a una temperatura entre 150 y 200ºC. Estos áridos se reclasifican, se dosifican y se mezclan con el betún caliente, además de con diversos tipos de polvo fino (filler), constituyendo la mezcla bituminosa en caliente.

Durante el año 2007, la industria de fabricación de mezclas bituminosas ha producido alrededor de 1600 millones de toneladas métricas de aglomerado asfáltico en el mundo [3]. Una cifra media sobre la energía consumida para fabricar una tonelada métrica de aglomerado asfáltico es alrededor de 85 KWh [4]. Por otra parte, la producción media mundial de crudo en el año 2007 fue de 84.523 millones de barriles por día [5]. Esto significa que la industria de fabricación de mezclas en su conjunto, ha consumido el 0.28% de la producción mundial de crudo, sin contar con el betún empleado como ligante. Por tanto, la minimización de los requisitos energéticos en la fabricación, y las consiguientes reducciones de emisiones en las plantas asfálticas se han convertido en puntos importantes a considerar.

2. CONCEPTO DE EXERGÍA

Existe un concepto bastante empleado en termoeconomía denominado exergía. Este concepto fue introducido en su versión moderna por Rantz en 1956 [6].

La exergía se puede definir como la parte de la energía que puede convertirse en trabajo mecánico. La parte de la energía que no se puede emplear se denomina anergía o entropía.

La exergía fue empleada en la termodinámica casi desde sus orígenes formales aunque con el nombre de trabajo disponible.

Hoy en día cobra una enorme importancia. Por un lado, porque la exergía siendo la medida cuantitativa de la máxima cantidad de trabajo que puede obtenerse de un desequilibrio entre un sistema físico y el ambiente que lo rodea o entorno, determinando cuantitativamente el valor termodinámico de cualquier recurso. Por otro lado, la exergía permite analizar rigurosamente el desperdicio de los recursos en las actividades de una sociedad, estableciendo pautas cuantitativas para su ahorro y uso eficiente.

No es extraño que el concepto haya resurgido plenamente en los países industrializados altamente consumidores de recursos, a raíz del embargo petrolero que en su contra ejercieron los miembros de la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP) a principios de la década de los setenta. La manera como los países industrializados reaccionaron al embargo fue buscando nuevos proveedores y bajando el gasto de petróleo mediante el ahorro y el uso más eficiente del recurso en los distintos sectores de la sociedad (industria, transporte, agricultura, etc.). La parte termodinámica del problema fue atacada por la Sociedad Americana de Física (American Physical Society), organismo que agrupa a los científicos de esta especialidad en los Estados Unidos. En el estudio que realizaron se introdujo la noción de exergía y la eficiencia de tarea termodinámica que, aplicada en cada caso, fue capaz de generar un ahorro enorme de recursos energéticos, suficientes para disminuir apreciablemente la dependencia del petróleo de la OPEP.

La exergía es la medida cuantitativa de la máxima cantidad de trabajo que puede obtenerse de un desequilibrio entre un sistema físico y el ambiente que lo rodea, o entorno; determina de forma cuantitativa el valor termodinámico de cualquier

recurso y permite analizar rigurosamente el desperdicio de los recursos en las actividades de una sociedad, estableciendo pautas cuantitativas para su ahorro y uso eficiente. Por tanto, la exergía es una propiedad de los recursos naturales, es útil en la sociedad y tiene un valor económico, es digna de estudio y consideración en los procesos. El paradigma aún no es reconocido en la ingeniería, menos aún en la sociedad; Wall comenta que, en el mundo de hoy, que funciona con combustibles fósiles, la segunda ley de la termodinámica puede ser la verdad científica en el siglo XXI [7].

La exergía es pues una cantidad física que depende de las variables de dos sistemas, en contraposición con la energía, que solo depende de uno (y de una referencia arbitraria). Tiene por ello una propiedad singular, su valor es cero cuando ambos sistemas están en equilibrio y de que es diferente de cero cuando están en desequilibrio. Es por ello que la exergía es la capacidad almacenada de realización de trabajo por dos sistemas en desequilibrio.

Hay exergía acumulada en el mar (por el contraste de temperatura entre la superficie y el fondo), en una masa de agua situada por encima del nivel del mar en una presa (por la diferencia de alturas), en una masa de vapor de agua en el subsuelo, como en la geotermia (por la diferencia de temperatura y presión con el aire de la atmósfera), en un cuerpo en rotación (por la diferencia en su velocidad de giro con respecto a los cuerpos en reposo), en una masa de petróleo o carbón (por la diferencia en composición química con la atmósfera), etc.

Como muestra, se presenta la comparación entre un análisis energético y otro exergético realizado sobre una caldera productora de vapor. En el balance de energía se determinó que se pierde 13,7% de la energía térmica que entra al generador de vapor. Las mayores pérdidas corresponden a los gases de combustión (13,6%), después les siguen las purgas (2,6%), los inquemados (1,5%) y por otras causas se pierde 2%. Por tanto el rendimiento energético es del 100-13,7 = 86,3%. Con la aplicación del balance exergético se determinó que el producto vapor sólo contiene 24,1% de la exergía total del fuel, destruyéndose alrededor de 75,9 % de la exergía, como consecuencia de las irreversibilidades. Por tanto el rendimiento exergético es del 24,1%. Para producir una unidad de exergía del producto vapor, la caldera emplea 4,22 unidades de exergía del fuel. Este ejemplo ilustra como un proceso con rendimiento energético alto (86,3%), puede esconder un derroche considerable de recursos, hecho que viene expresado por el rendimiento exergético bajo (24,1%).

3. ANÁLISIS ENERGÉTICO Y EXERGÉTICO.

Ha habido un interés creciente en técnicas de modelización basadas en análisis energético y exergético para la cuantificación del empleo de energía en diversos sectores tales como el de producción de potencia, o calefacción y refrigeración.

Sin embargo, las referencias relativas a materiales y a procesos en la industria de construcción son bastante escasas. Se han encontrado estudios en la industria de fabricación de cemento basados en análisis energéticos y energéticos. En [8] Camdali et al. presentan un análisis del secadero-calcinador en una planta de

cemento, incluyendo los procesos térmicos y químicos. Los resultados indican que, aunque el rendimiento energético es del 97%, la eficiencia energética es solo del 64,4%. Además estos estudios pueden indicar la localización de los procesos en los que la degradación de la energía se produce. En [9], Rasul et al, identifican las partes de los procesos en los que es posible una optimización en el tratamiento energético en base a los análisis energético-exergético del kiln y de los sistemas de enfriamiento de una planta de cemento existentes. En [10] Utlu et al. empleando datos operacionales reales de una planta en funcionamiento, se realiza el análisis energético-exergético del molino primario, y de la unidad de preproceso de materias primas. En ambos casos [9,10], la exergía química de las sustancias implicadas fue despreciada. También en [11], realizan el análisis para un molino de puzolanas, y por último en [12] Sogut realiza el análisis del potencial de recuperación de energía de los gases de escape en una planta de cemento. Todos estos análisis se han realizado para un solo punto de operación de las plantas.

En el caso de plantas asfálticas, la literatura es bastante escasa. Se están desarrollado nuevas tecnologías en la fabricación de mezclas asfálticas encaminadas a una reducción de los consumos energéticos, los cuales redundarán en un menor consumo de combustibles y reducción de emisión de gases de efecto invernadero.

Las tecnologías de fabricación a menor temperatura se clasifican habitualmente en dos grandes grupos: mezclas semicalientes (warm mix asphalt) y mezclas templadas (half-warm mix asphalt). La clasificación atiende al rango de temperatura de mezclado, aunque en algunos casos hay procesos tecnológicos que se encuentran a caballo entre ambas. Un resumen de las principales tecnologías semicalientes (las más utilizadas) sería el siguiente:

- Basadas en procesos químicos:
    - CECABASE RT
    - Evotherm
    - Hypertherm/Qualitherm
    - Rediset WMX
- Basadas en procesos de espumación:
    - Accu-Shear
    - Advera WMA
    - AQUABlack WMA System
    - Aquafoam
    - Aspha-Min
    - Double-Barrel Green

- Eco-Foam II
- LEA (Low Emission Asphalt)
- Meeker Warm Mix
- Terex WMA System
- Tri-Mix Warm Mix Injection System
- Ultrafoam GX2 System
- WAM Foam

- Basadas en aditivos orgánicos
  - Astech PER
  - Sasobit
  - SonneWarmix
  - Thiopave
  - TLA-X Warm Mix

Estudios en esta línea se han realizado recientemente dentro del Proyecto Fénix, en concreto, existen tareas en las que se hace un desarrollo técnico de las mezclas con menor necesidad energética tanto de las mezclas templadas (tarea 4) como de las mezclas semicalientes (tarea 7) y un estudio medio ambiental y energético en las centrales de fabricación de mezclas asfálticas (tarea 12).

También Jullien et al. [14] han estudiado la influencia de los parámetros de operación de una planta asfáltica en las emisiones en la chimenea en un rango de variación de los mismos. Los resultados resaltan la correlación entre las emisiones con la intensidad de combustión, los consumos energéticos y la eficiencia de la combustión. De hecho, el consumo energético en una planta asfáltica tradicional es principalmente debida al calentamiento y secado de los áridos en el secadero (más del 95%). Ambos procesos (calentamiento y secado) son factores clave en las posibilidades de ahorros energéticos y en incrementar la sostenibilidad de la industria.

Los estudios realizados por la tarea 12 del proyecto Fénix sobre varias de las plantas de fabricación pertenecientes a los socios del proyecto corroboran estos datos.

En este caso se analizaron varios tipos de instalaciones distintas (continuas, discontinuas, móviles, con y sin posibilidad de reciclado) obteniéndose datos de todas la entradas y salidas del sistema tanto a nivel energético como de balance de materiales.

En el documento [15] se pueden consultar los inventarios realizados a las instalaciones que se han establecido para cada elemento que interviene en la fabricación, referidos siempre a la unidad funcional de consumo por tonelada de mezcla asfáltica producida, calculada en base a la media de datos obtenidos a lo largo de un año de fabricación, en concreto el de 2009. Del tratamiento y análisis de estos datos tenemos los siguientes resultados:

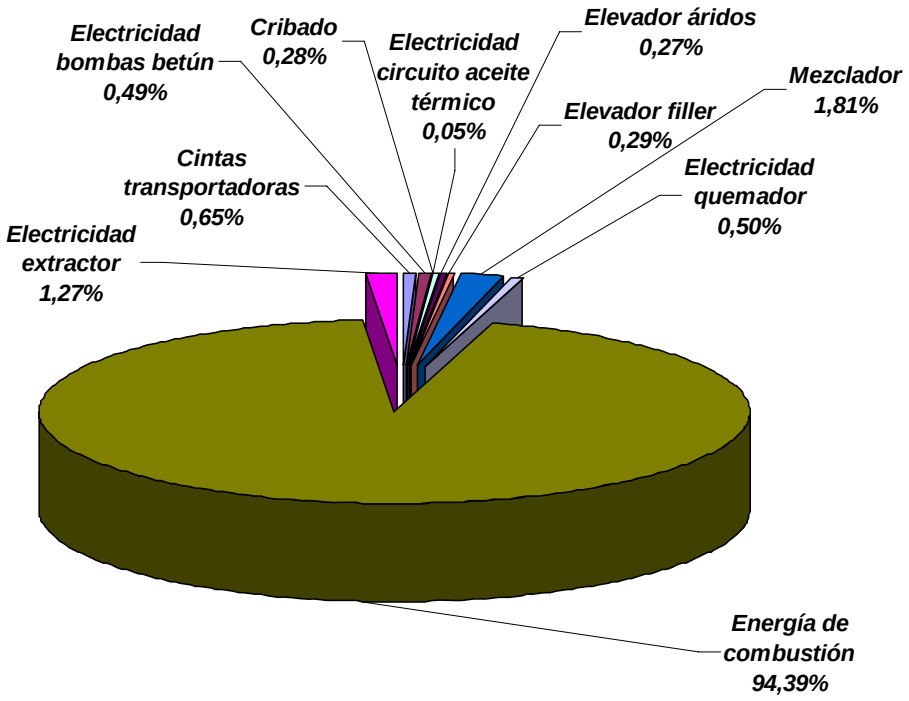


Figura 1: Distribución porcentual del consumo energético en una central de fabricación de Mezcla Asfáltica en caliente.

En la Figura 1 adjunta, se puede apreciar como son los procesos relacionados con la combustión de los materiales fósiles, los que presentan un mayor consumo de energía dentro del proceso productivo de las instalaciones de fabricación de mezcla asfáltica.

Haciendo un análisis únicamente del mayor foco de consumo energético que es el secadero (Figura 2), podemos identificar en que es empleada y cuáles son las principales perdidas energéticas que se producen en este subsistema, referido a la energía proporcionada por los combustibles utilizados:

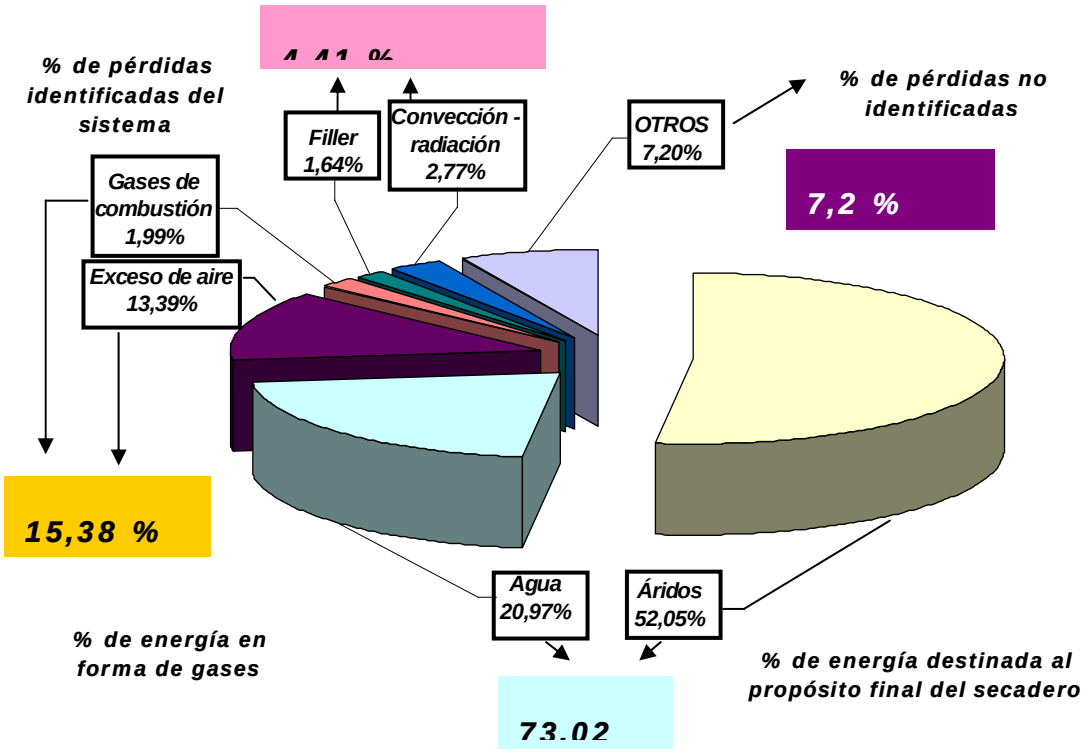


Figura 2: Distribución porcentual de la energía proporcionada por el combustible en el subsistema del secadero de una planta asfáltica.

Según estos datos, únicamente el 73 % de la energía que suministra el combustible, es aprovechada para el propósito final de secadero que es secar y calentar el árido.

No existe mucha literatura sobre estudios parecidos, hay un primer trabajo realizado por Ang et al. [16], en el que se cubre un análisis de inventario energético en la mezcla de áridos graníticos con betún, con un especial énfasis en el contenido en humedad de los áridos, factor que resulta crítico en la determinación de los requerimientos energéticos del proceso. Sin embargo, no se consideró ninguna irreversibilidad en los procesos.

En [17], Peinado et al. realizaron una modelización completa del análisis energético-exergético del secadero de una planta asfáltica, resumiéndose a continuación los principales puntos.

4. APLICACIÓN DEL ANÁLISIS AL SECADERO DE UNA PLANTA ASFÁLTICA.

En el artículo [17], se realizan las siguientes aportaciones:

Identificar las principales pérdidas energéticas e irreversibilidades en el sistema del secadero de una planta asfáltica, donde se han tenido en cuenta, la humedad de los áridos, los factores de la combustión, así como el contenido de filler en los áridos.

Proporcionar una guía para correcciones en la operación de la planta con objeto de ahorrar energía, así como la reducción de las irreversibilidades asociadas a los procesos de secado y calentamiento de los áridos por medio de un análisis de sensibilidad.

Fomentar el empleo de sistemas de cogeneración para evitar las enormes pérdidas de exergía encontradas en este sistema.

En él se puede consultar la modelización de los procesos, así como las expresiones que permiten realizar en análisis energético-exergético. Los resultados se muestran a continuación.

En primer lugar se presentan los valores de los parámetros de operación del secadero modelado en la Tabla 1.

Variable	Reference	Range	Variable	Reference	Range
$T_{amb}(°C)$	10	0 - 50	f_r (%)	1	—
$T_{m_{out}}(°C)$	170	150 - 200	$T_{e,d}(°C)$	$T_{a_{out}}$	60 - 130
$T_{a_{out}}(°C)$	100	60 - 130	$T_{fi}(°C)$	80	—
X_{in} (%)	3	1 - 7	λ	2.25	1.25 - 4.00
X_{out} (%)	0.5	—	$T_b(°C)$	150	—
f_{ag} (%)	8	5 - 20	ϕ_0 (%)	50	10 - 100

Tabla 1: Valores de referencia y rango de variación de los parámetros de operación de la planta.

En el modelo empleado, se ha de especificar una atmósfera de referencia en la cual además de los procesos térmicos, se han de tener en cuenta fenómenos de difusión de los distintos productos de la combustión. Por tanto, en la Tabla 2, se presentan tanto los datos de la atmósfera de referencia, como las fracciones másicas de los gases de combustión en base seca.

Reference Atmosphere			Dry Combustion Gases	
Specie	Mole frac.		Specie	Mass fraction
	Dry	$\phi = 50\%(10°C)$		
N_2	0.7803	0.7755	N_2	0.7553
O_2	0.2099	0.2086	O_2	0.1290
H_2O	0.0000	0.0061	H_2O	0.0000
CO_2	$3.1 \cdot 10^{-4}$	$3.08 \cdot 10^{-4}$	CO_2	0.1008
Ar	0.0095	0.0094	Ar	0.0131
			SO_2	0.0018

Tabla 2: Composición de la atmósfera de referencia, fracción molar en base seca y húmeda para una humedad relativa del 50% a 10ºC y un bar de presión; y fracción másica de las diferentes especies presentes en los gases de combustión.

Los resultados generales se presentan en la Tabla 3.

Mass	kg	Energy	kWh	Exergy	kWh	Inlet/Exit gases	
m_F	5.65	E_{burner}	63.114	Ψ_{in}	68.183	ω_{in}	0.0038
m_{dgc}	176.76	E_p	57.437	Ψ_{out}	12.358	ϕ_{in}	50 %
$m_{v_{out}}$	31.06			I	55.518	$T_{a_{in}}$	10°C
m_a	176.96	E_{used}	56.571	Ψ_{used}	11.347	ω_{out}	0.1757
		E_{waist}	0.866	Ψ_{waist}	0.506	ϕ_{out}	21.7 %
		E_{fg}	4.745	Ψ_{fg}	0.504	$T_{a_{out}}$	100°C
		Q_{loss}	0.933	Ψ_{loss}	0.307		
		η_t	89.63%	ϵ_g	18.12%		
				ϵ_t	15.73%		

Tabla 3: Resultados generales: términos de masa, energía y exergía por tonelada métrica de aglomerado asfáltico. Humedades absolutas y relativas de los gases de entrada y salida.

Todos los resultados se han expresado por tonelada de mezcla bituminosa. La energía requerida por el quemador es prácticamente independiente del tipo de combustible empleado. En este estudio se ha tomado fuel pesado como combustible de referencia. Esta energía requerida por tonelada es de 63114 kWh. Esta primera cifra permite tener una estimación de la potencia requerida por el quemador. Por ejemplo para una planta de 200 t/h y los parámetros de operación de referencia, tenemos que Qquemador = 63114 kWh/t x 200 t/h = 12623 Kw = 12,6 MW. Para otros parámetros, consúltese [16]. Además también permite estimar las emisiones relacionadas. Por ejemplo, para calcular la emisión de CO2, tenemos de la tabla 2 que su fracción másica es de 0,1008, de la tabla 3 tenemos que la masa de los gases de combustión secos es de 176,76 kg por cada tonelada de aglomerado, por tanto para 200 t/h, tendremos 0.1008x176,76x200 kg/h = 3564 kg/h. De esta forma se pueden calcular las emisiones en base horaria, o para una producción anual determinada. Por ejemplo para 100.000 toneladas al año, tendremos 1782 toneladas al año de CO2

Es de destacar que la energía empleada por el proceso es comparable a la proporcionada por el quemador, con lo cual se obtiene una alta eficiencia del proceso (~89.6%). Estos valores están en concordancia con los valores característicos encontrados en plantas asfálticas cuando operan en estado estacionario, aunque en condiciones normales los valores son algo más altos debido a los transitorios que se producen como consecuencia de paradas en la cadena de suministro, principalmente problemas en operaciones de extendido, o un reparto no uniforme en el tiempo de los camiones de transporte desde la planta hasta la obra.

La energía transportada por los gases de la chimenea es la fuente principal de pérdidas (7,5%), aunque en condiciones normales esta temperatura no puede ser reducida por que aparecerían problemas de condensación en los sistemas de depuración, provocando problemas de corrosión especialmente cuando el combustible tiene azufre. Los otros términos son los debidos al filler en los áridos que se calienta pero no se emplea (1,4%), y a las pérdidas por el tambor secador (1,5%) cuando no está calorifugado.

En esta tabla 3, también se presentan los resultados del análisis exergético en las condiciones de referencia. Llama la atención la gran diferencia entre la exergía que entra en el sistema, y la que sale (68.183 kWh de entrada y 12.358 kWh de salida), siendo esta diferencia el término de destrucción de exergía I = 55.518 kWh. De estos valores se obtienen las dos eficiencias exergéticas, la global referida a las exergías de salida y las de entrada, y la eficiencia del proceso, referida a la exergía empleada sobre la de entrada, siendo respectivamente iguales al 18,12% y el 15,73%.

Por tanto es importante ver de dónde procede este enorme término de destrucción de exergía. En los trabajos de Nishida et al. [18] y de Som y Datta [19], se investiga la destrucción de exergía en procesos de combustión. Los autores concluyen que los términos de destrucción de exergía pueden variar entre el 20 y el 50% de la exergía suministrada dependiendo de dosado relativo y de la temperatura del aire a la entrada.

Para poder estimar la parte de la destrucción de exergía que es debida al proceso de combustión en nuestro caso, se presenta un modelo de cálculo en dos etapas. En primer lugar, se realiza un proceso de combustión adiabático, seguido por los procesos de transmisión de calor necesarios para el proceso de secado-calentamiento.

De este modelo, se obtiene que la destrucción debida únicamente a la combustión es $I_c = 28.46$ kWh, y la debida a la transferencia de calor a los áridos es de $I_c = 26.71$ kWh.

Por tanto, la combustión es la responsable de más de la mitad de la destrucción de exergía en el secadero de la planta asfáltica.

Este hecho es de suma importancia, ya que se plantea la posibilidad de emplear el alto contenido exergético de los reactivos en producción de trabajo, y después, emplear los gases de escape del ciclo de producción de potencia todavía con un contenido energético suficiente para efectuar el secado y calentamiento de los áridos.

Otra información importante que se puede extraer del análisis combinado energía-exergía, es analizar la posibilidad de recuperación de energía del proceso.

Consideraremos la posibilidad de recuperar energía de los gases de la chimenea, y del vapor de agua contenido en los gases de la chimenea.

Si se realiza únicamente un análisis energético, se podría pensar en resultados que después no pueden ser obtenidos con las barreras tecnológicas y económicas que pueden ser explicadas fácilmente en términos de exergía.

Por ejemplo, si vemos los valores de la Tabla 3, los gases de escape tienen un cierto contenido energético $E_{fg} = 4.745$ kWh, un 7,5% de la energía introducida por tonelada de aglomerado. Sin embargo, como se puede ver en la citada tabla, su contenido exergético es muy reducido, $\Psi_{fg} = 0.504$ kWh.

Por otro lado, y viendo el éxito que están teniendo en los últimos tiempos las calderas de condensación, se podría pensar en condensar parte o la totalidad del vapor de agua presente en los gases de chimenea. De la energía empleada en el proceso $E_{used} = 56.57$ kWh, hay una parte empleada en calentar el sólido $E_{usedSolid} = 39.97$ kWh, y otra empleada en secarlo $E_{usedVapor} = 19.60$ kWh. Esta última constituye un 31% del total de la energía introducida, así que se podría plantear la posibilidad de condensar todo o parte del vapor para intentar recuperar toda esta energía. Sin embargo, del análisis exergético, se obtiene que el contenido exergético del vapor es $\Psi_{usedVapor} = 3.645$ kWh, mucho menor que el contenido energético. Estos valores se presentan en la tabla 4 para su comparación. En ella se ha incluido los valores de las potencias instantáneas involucradas para una planta de 200 t/h de producción.

Energetic analysis	kWh	$200t/h(MW)$	Energetic analysis	kWh	$200t/h(MW)$
E_{used}	56.571	11.31	Ψ_{used}	11.347	2.27
$E_{used_{solid}}$	36.971	7.39	$\Psi_{used_{solid}}$	7.703	1.54
$E_{used_{vapor}}$	19.60	3.92	$\Psi_{used_{vapor}}$	3.645	0.73
E_{fg}	4.745	0.95	Ψ_{fg}	0.504	0.10

Tabla 4: Análisis comparativo Energético-Exergético para una planta de 200 t/h

En cuanto al análisis de sensibilidad, en el que se analiza la influencia de las variables de operación en los requerimientos energéticos y energéticos, se resume a continuación.

El análisis revela que un incremento de la temperatura ambiente hace que la energía requerida por el quemador disminuya, ya que el contenido energético de los áridos a la entrada es mayor. De igual modo, el rendimiento térmico aumenta. Por otra parte, aunque la exergía necesaria a la entrada disminuye de forma similar a la energía necesaria, se aprecia una disminución de rendimiento exergético de un 8%. Esta tendencia puede ser explicada debido a que los productos a la salida tienen un estado más próximo al estado muerto (estado de equilibrio con el ambiente). Cambios en la humedad relativa no tienen importancia. Solo se ve una disminución en la eficiencia exergética global, pero para cambios muy importantes en la humedad (10 – 100%).

5. TEMPERATURA DE LA MEZCLA Y HUMEDAD DE LOS ÁRIDOS.

En primer lugar se estudia el impacto de la temperatura de la mezcla y de la humedad de los áridos (ver Figuras 3 y 4). El primer parámetro es fácilmente controlable en la planta y debería de ser la mínima temperatura que permita una compactación adecuada después del extendido. Sin embargo, si la temperatura ambiente es baja, y hay una distancia de transporte notable, la temperatura ha de subirse para compensar las pérdidas térmicas que acontecen en los camiones desde la planta hasta la obra. Una actividad bien planificada debería de disminuir este valor al mínimo posible.

La humedad de los áridos es otro parámetro de gran importancia y que controla fuertemente el rendimiento de la planta. Depende del procedimiento de extracción en la cantera, de la forma en el que los acopios están protegidos de la lluvia, e incluso como el operador de la pala recoge los áridos antes de introducirlos en las tolvas predosificadoras. Valores típicos encontrados en plantas asfálticas en Europa son 1%-7% en peso del árido procesado.

Como se puede ver en la Figura 3, la humedad de los áridos afecta directamente a la energía requerida para el proceso de secado: un incremento del 4% en el contenido de agua, implica un incremento del 60% en la energía necesaria por el

secadero. Una posible forma de paliar este incremento sería el de disminuir la temperatura de la mezcla si fuera posible. Como valores orientativos, la demanda energética es de unos 2,62 kWh por cada 10ºC de subida en la temperatura de la mezcla, y de unos 8,21 kWh por cada incremento en 1% de la humedad de los áridos. Si aumenta la humedad presente en los áridos, o cuando la temperatura de la mezcla aumenta, el exceso de energía necesitado se emplea en el secado o en la temperatura de salida del producto. Por tanto, la eficiencia energética no varía. De igual modo, el efecto del incremento en la humedad de los áridos sobre los flujos de exergía consiste en incrementar la exergía de entrada, aumento que se invierte en la exergía de los productos de salida (Figuras 3b y 3c).

Sin embargo, el término de destrucción de exergía aumenta con la humedad (Figura 3d) dado que el incremento de energía necesaria conlleva un aumento de la cantidad de combustible quemado, y por tanto ocurre una mayor irreversibilidad asociada al proceso de combustión.

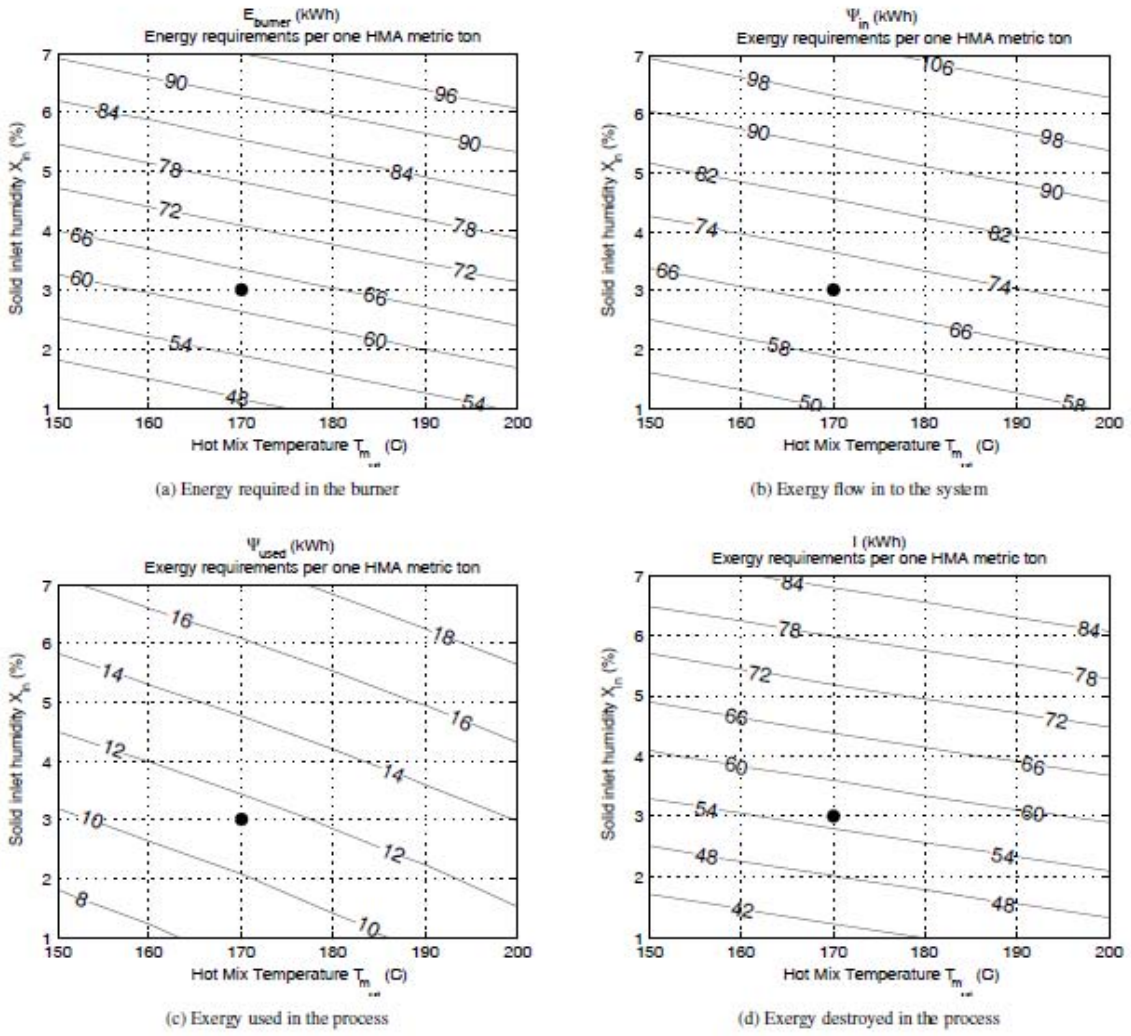


Figura 3: Análisis energético y exergético: influencia de la temperatura de mezcla y de la humedad de los áridos.

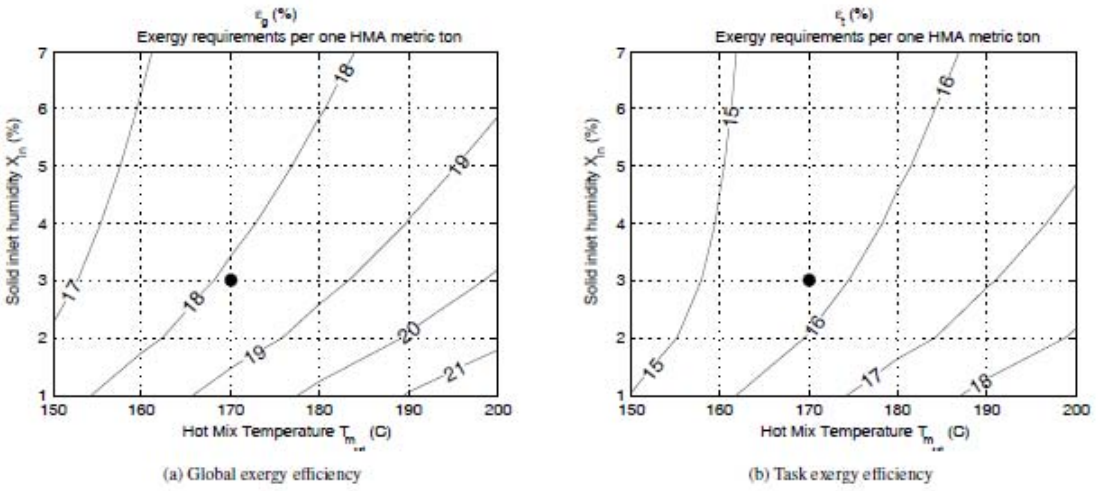


Figura 4: Análisis exergético: influencia de la temperatura de mezcla y de la humedad de los áridos.

6. FRACCIÓN DE FILLER EN LOS ÁRIDOS Y TEMPERATURA DE SALIDA DE LOS GASES.

Otros parámetro que debe de ser tenido en cuenta en las características de los áridos y que afecta a la operación de la planta es el contenido de filler en los áridos. Este parámetro puede sufrir importantes variaciones durante la operación de una planta asfáltica. Esta fracción puede variar entre el 5% y el 20%. Analizando las desviaciones con respecto a la condición de referencia, se puede ver en la Figura 5, que un incremento del 5% del contenido de filler en áridos, se traduce en un 4,2% de incremento de energía suministrada al quemador, pero este incremento solo es parcialmente empleado en el proceso, razón por la cual el rendimiento decrece casi un 2% (Figura 5b). Tal y como explica Peinado et al. [17], el fenómeno de elutriación en el secadero rotatorio es un mecanismo que reduce la eficiencia global de la planta asfáltica y aumenta la energía requerida por unidad de masa del producto final, dando aproximadamente un incremento de 0,5 kWh por cada 1% de filler en áridos.

También se puede ver en la Figura 5b, que si la planta puede operar con una reducción de 10ºC en la temperatura de salida de los gases, los incrementos producidos por el contenido de filler se pueden compensar. Desafortunadamente, esta temperatura no es siempre independiente de la temperatura de salida de los áridos del secadero, aunque en la actualidad, dispositivos de control específicos basados en el control electrónico de velocidad de giro del tambor se están empleando con éxito.

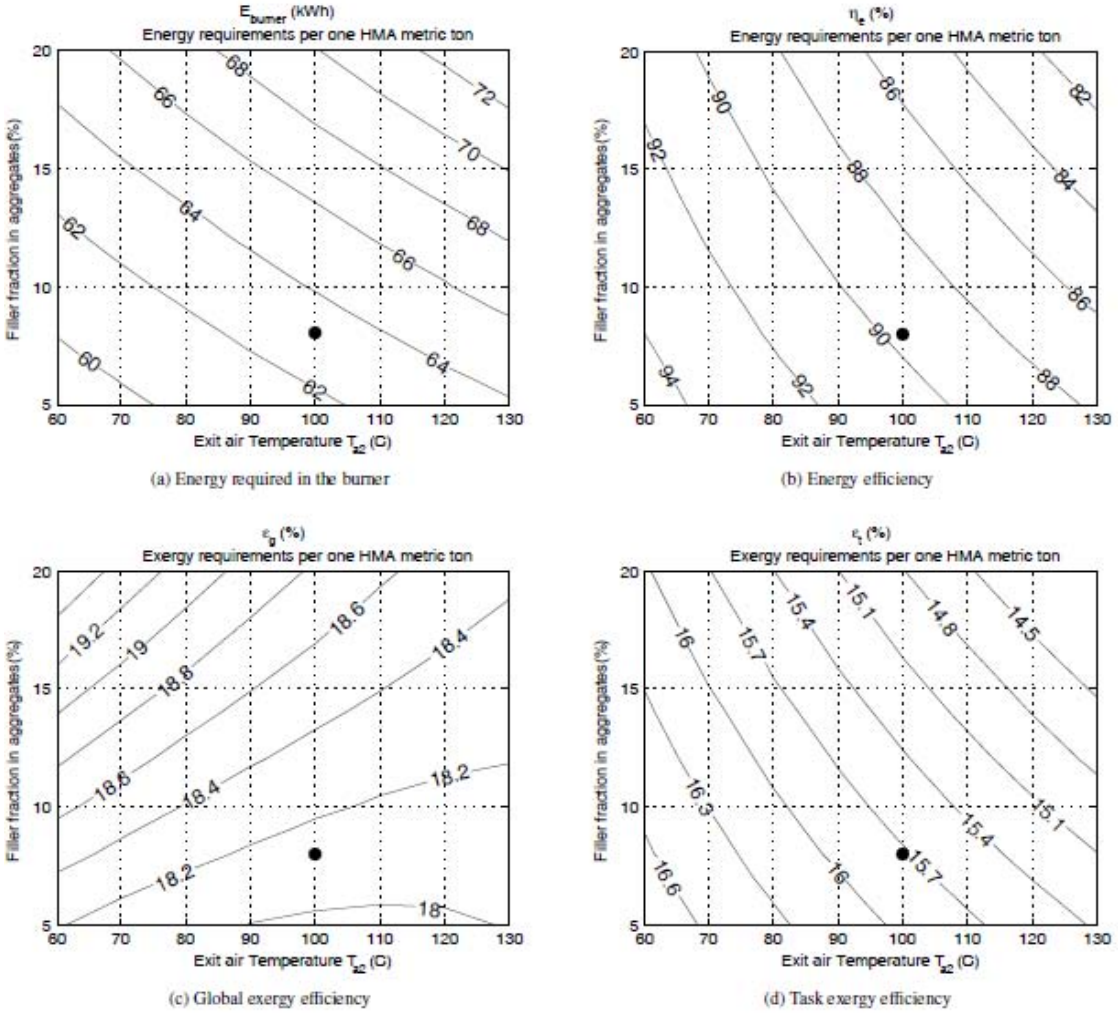


Figura 5: Análisis energético y exergético: influencia de la temperatura de salida de los gases del secadero, y del contenido de filler en los áridos.

La exergía aumenta con el contenido de filler. Un 10% de incremento de filler, reporta un aumento del 8.8% en la exergía requerida en la entrada, pero la destrucción de exergía aumenta casi en la misma proporción (8.2%).

7. POSIBILIDADES DE APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO EN LA PLANTAS DE FABRICACIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA.

Con todo lo expuesto anteriormente se puede deducir que las mayores perdidas de exergía las tenemos en el propio proceso de combustión, es decir que quemar combustible únicamente para secar y calentar el árido necesario para la fabricación de las mezclas asfálticas, es poco rentable cuando realizamos el balance exergético. Y por lo tanto, actuaciones que de verdad fuesen encaminadas a mejorar esta eficacia, deberían ir orientadas a sustituir estos métodos de calentamiento por otros en los que el proceso productivo de las mezclas asfálticas aprovechase el calor

proveniente de otros procesos, como por ejemplo, el de la producción de energía eléctrica mediante cogeneraciones u otras actividades.

Esto a nivel operativo, es una situación que solo se puede dar en contadas ocasiones, ya que significaría situar las plantas asfálticas en importantes núcleos productivos, con mucha demanda de energía eléctrica, que no siempre son los mas idóneos para las necesidades logísticas de abastecimiento de materias primas o distancias a las obras receptoras de material.

Por esta razón por el momento nos tenemos que conformar con exponer actuaciones de aprovechamiento energético, sobre facetas del proceso productivo de menor incidencia en la eficiencia final.

Desde la Tarea 12 del proyecto Fénix se abordaron algunas de estas propuestas que están recogidas en la documentación del proyecto [20], estas se dividen en tres grandes grupos:

7.1 MECANISMOS RELACIONADOS CON LA TRASMISIÓN DE CALOR.

Se trata de un trabajo realizado sobre situaciones reales, donde se evalúa la cantidad de energía que no desperdiciaríamos si se mejorara el calorifugado de ciertas partes de la planta, como por ejemplo; los silos en caliente, las conducciones de betún, los tanques de almacenamiento y en el tambor secador.

IDENTIFICACIÓN DE TIPO DE ACTUACIÓN	*PROPUESTAS DE MEJORA*	*SOLUCIÓN TÉCNICA PROPUESTA*	*RESULTADO*
Mecanismos de transmisión de calor y asilamiento térmico	Aislamiento del tambor secador de	Instalación de un aislamiento de lana mineral de 40 mm de espesor	Reducción de un 93% de las pérdidas por radiación / convección en el tambor secador
	Aislamiento de silos para aprovechamiento de	Instalación de un aislamiento de lana mineral. Distintos espesores en función de objetivos a cumplir	Disminución de hasta un 0,71% del consumo dedicado al calentamiento de áridos.
	Aislamiento de conducciones	Instalación de un aislamiento de lana mineral.	Disminución de un 12,5% del gasoil utilizado en la caldera de aceite térmico
	Aislamiento y horizontalidad-verticalidad en los depósitos de betún	Instalación de un aislamiento de lana mineral de 20 cm que evita calentamiento de betún entre jornadas de producción consecutivas	Disminución de un 0,38 % del G.N. usado en la caldera de aceite térmico

Tabla 5: Aprovechamiento energético: aislamientos térmicos.

7.2 OPTIMIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS Y PROCESOS

En este bloque se evalúan las pérdidas energéticas que se producen debidas a las condiciones en las que tenemos nuestras materias primas, como puede afectar la calidad de los áridos, los desajustes en la granulometría, contenido en filler de las arenas y el grado de humedad de los mismos y por último, el exceso de consumo

debido a una producción diaria intermitente con continuas arrancadas y paradas de la planta.

IDENTIFICACIÓN DE TIPO DE ACTUACIÓN	*PROPUESTAS DE MEJORA*	*SOLUCIÓN TÉCNICA PROPUESTA*	*RESULTADO*
Optimización de materias primas y procesos	Estudio sobre el contenido en filler de los finos	Incorporación de un equipo de desfillerizado previo al calentamiento de áridos	Ahorro en combustible del secador (0,097m³ G.N./t M.B.), transporte y disposición final de filler gracias al uso de un desfillerizador en cantera
	Estudio del proceso de secado de áridos en función de su humedad	Instalación de una cubierta para evitar la humedad en la arena	Ahorro anual de 32 toneladas de fuel en el proceso de secado de áridos
	Estudio de las pérdidas debidas a arranque-parada	No existe una solución técnica, únicamente se ha evaluado el coste ambiental de las arrancadas y paradas extras	Se obtiene un ahorro potencial de entre 10 y 15 t de fuel anuales

Tabla 6: Aprovechamiento energético: materias primas y procesos

7.3 RECUPERACIÓN DE LA ENERGÍA DE LOS GASES DE ESCAPE.

En este apartado es en el cabe esperar un mayor aprovechamiento energético, lo que se plantea, mediante un modelo matemático, es la posibilidad de emplear un cambiador de calor gas-gas para extraer energía del flujo de gases a la salida del filtro de mangas, y que sirva por ejemplo para precalentar el aire de entrada al quemador. En este caso, la temperatura de entrada al proceso de combustión, ya no sería igual a la temperatura ambiente, y por tanto las necesidades energéticas disminuirían. También se plantea lo mismo para los gases de escape de una posible cogeneración.

En un cambiador de este tipo siempre deberá de existir un salto térmico entre ambas corrientes. Suponiendo que podemos disminuir la temperatura de estos gases en el cambiador hasta 50ºC se obtiene una recuperación de calor de: $\dot{Q}_R$ = 460,33 kW. Inicialmente se podría intentar condensar el vapor de agua contenido en los gases y aumentar la cantidad de calor recuperado

Sin embargo hay dos problemas; El primero es la dificultad de condensar, con una diferencia tan pequeña de temperaturas y por otro lado lo que ocurriría en realidad es que únicamente se humedecería la superficie de intercambio, y después prácticamente no se condensaría nada, teniendo a la salida condiciones de super-saturación. Por tanto, y a pesar de tener que emplear un cambiador de calor de material inoxidable y fácilmente limpiable para eliminar posibles incrustaciones de sales, la cantidad de calor latente que se recuperaría sería muy pequeña.

El recuperador de calor propuesto es de tubos con aletas por los que circula el aire a calentar. Los gases (posiblemente sucios) procedente de chimenea, pasan por fuera de los tubos. Los tubos del cambiador de calor son dispuestos al tresbolillo tal y como se indica en la figura 6

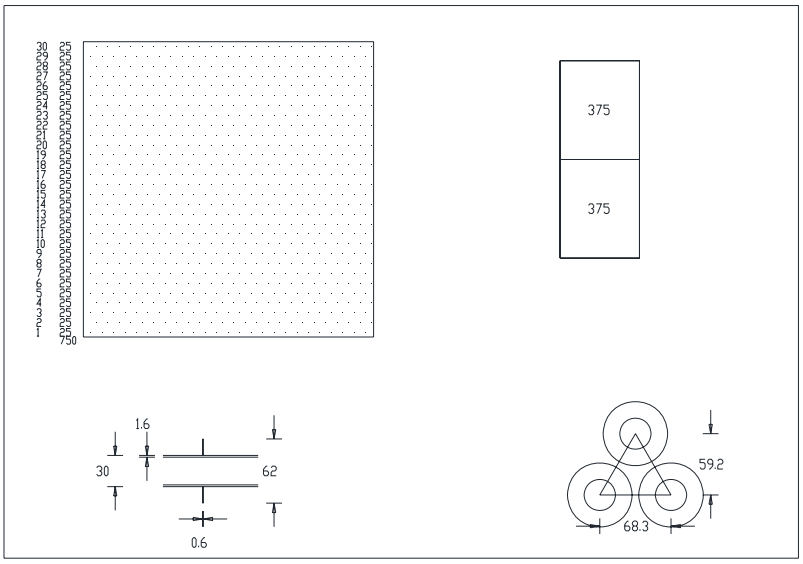


Figura 6. Esquema del cambiador

El problema es que para conseguir intercambiar 460 kW, teniendo como límite el flujo másico de aire precalentado a unos 5,1 kg/s, la temperatura de salida de éste estaría alrededor de los 110ºC, temperatura muy próxima a la de entrada de los gases calientes, por lo cual el cambiador no funcionaría. Si limitamos el intercambio de calor a 420 kW, entonces la temperatura de salida de los gases fríos sería de unos 100ºC, siendo éste el límite tecnológico para un cambiador de calor del tipo empleado.

El precio de este cambiador estaría alrededor de 82.000€. A esta cantidad habría que sumarle unos 15.000€ del ventilador, conducciones, etc.

El ahorro energético conseguido sería menor. Además tendríamos que incluir la potencia necesaria para el ventilador de impulsión del aire fresco. El rendimiento teniendo en cuenta únicamente el calor recuperado:

$$\dot{Q}_R = 420.0 \cdot kW$$

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{util}}{\dot{Q}_{burner} - \dot{Q}_R} = 92.38\%$$

El ahorro de combustible para una producción de 100 t/h será de 37,20 kg/h de fuel.

Calculos parecidos se han realizado para el caso del aprovechamiento energético de los gases de escape de la cogeneración resultando:

IDENTIFICACIÓN DE TIPO DE ACTUACIÓN	*PROPUESTAS DE MEJORA*	*SOLUCIÓN TÉCNICA PROPUESTA*	*RESULTADO*
Recuperación de la energía de los gases de escape	Estudio de aprovechamiento de los gases de chimenea del tambor	Instalación un cambiador gas-gas de forma que se precaliente el aire que se introduce en el quemador	Ahorro de 0,37 kg/t M.B. en el tambor secador
	Estudio de aprovechamiento de los gases de cogeneración	Instalación un cambiador gas-gas de forma que se precaliente el aire que se introduce en el quemador	Ahorro de 0,37 kg/t M.B. ó 0,77 kg/t M.B. de fuel en función de intercambiador propuesto

Tabla7: Aprovechamiento energético: gases de escape.

8. CONCLUSIONES.

En este texto se ha presentado el mapa energético que distribuye e identifica los elementos más relevantes en el proceso de fabricación de la mezcla asfáltica , tanto desde una parte empírica como teórica, presentada en los datos sobre casos particulares recogidos por la tarea 12 del Proyecto Fénix, como los modelizados en la publicación de Peinado [17]. En ambos se llega a la conclusión que el elemento determinante del sistema lo constituye la combustión de combustibles fósiles empleados para el secado y calentamiento de los áridos.

En este último se da un paso más y nos introduce el concepto de exergía como ”La capacidad almacenada de realización de trabajo por dos sistemas en desequilibrio”, esta magnitud determina de forma cuantitativa el valor termodinámico de cualquier recurso y permite analizar su desperdicio, mostrándonos, como un sistema que aparentemente presenta una buena eficacia desde un punto de vista energético, resulta ineficaz cuando analizamos su exergía. Como ocurre en el caso de la fabricación de las mezclas asfálticas, en el que la baja eficiencia exergética, está mayoritariamente asociada a la utilización de los procesos de combustión únicamente para el secado y calentamiento de los áridos.

También se indican en el documento varias actuaciones, para conseguir un mayor aprovechamiento energético, resultando la asociada a los gases de escape y humedad de las materias primas como las más interesantes, y subrayando que la máxima optimización energética y exergética del sistema, vendría de combinar este proceso productivo con otro que posea un excedente de energía térmica suficiente

para secar y calentar los áridos y materias primas necesarias para la fabricación de mezclas asfálticas.

9. REFERENCIAS.

[1] P. Whitea, J. S. Goldenb, K. P. Biligiri, K. Kaloushd, Modeling climate change impacts of pavement production and construction, Resources, Conservation and Recycling 54 (2010) 776–782.

[2] S. T. Muench, Roadway Construction Sustainability Impact Reviews of Life-Cycle Assesments, Transportation Research Record 2151 (2010) 36–45.

[3] European Asphalt Pavement Association, Asphalt in Figures, EAPA:http://www.eapa.org/START/AIF/aif.htm accessed 18, 11, 2009.

[4] Environmental Guidelines on Best Available Techniques (BAT) for the Production of Asphalt Paving Mixes, European Asphalt Pavement Association, Rue du Commerce 77, 1040 Brussels, Belgium, 2007.

[5] U.S. Energy Information Administration, Official Energy Statistics from the U.S. Government, Energy Information Administration: http://www.eia.doe.gov/ipm/supply.html accessed 18, 11, 2009.

[6] RANT Z.,. “Exergie, ein neues Wort fur "Technische Arbeitsfahigkeit"”, Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens, 22, 1956, 36–37.

[7] Wall, G. 2002, "Conditions and tools in the design of energy conversion and management systems of a sustainable society", Energy Conversion and Management, vol. 43, no. 9-12, pp. 1235-1248.

[8] Ünal Camdali, A. Erisen, F. Celen, Energy and exergy analyses in a rotary burner with pre-calcinations in cement production, Energy Conversion and Management 45 (2004) 3017–3031.

[9] M. G. Rasul, W. Widianto, B. Mohanty, Assessment of the thermal performance and energy conservation opportunities of a cement industry in Indonesia, Applied Thermal Engineering 25 (2005) 2950–2965.

[10] Z. Utlu, Z. Sogut, A. Hepbasli, Z. Oktay, Energy and exergy analyses of a raw mill in cement production, Applied Thermal Engineering 26 (2006) 2479–2489.

[11] M. Z. Sogut, Z. Oktay, A. Hepbasli, Energetic and exergetic assessment of a trass mill process in a cement plant, Energy Conversion and Management 50 (2009) 2316–2323.

[12] Z. Sogut, Z. Oktay, H. Karakoc¸, Mathematical modeling of heat recovery from a rotary kiln, Applied Thermal Engineering 30 (2010) 817–825.

[13] M. O. Hamzah, A. Jamshidi, Z. Shahadan, Evaluation of the potencial of Sasobit to reduce required heat energy and CO2, Journal of Cleaner Production doi:10.1016/j.jclerpro.2010.08.002.

[14] A. Jullien, V. Gaudefroy, A. Ventura, C. de la Roche, R. Paranhos, P. Moneron, Airborne Emissions Assessment of Hot Asphalt Mixing Methods and Limitations, Road Material and Pavement Design 1 (2010) 149–169.

[15] Entregable: “FENIX PAV ENT 12.1 “BALANCE ENERGÉTICO Y DE MATERIALES DEL PROCESO” del proyecto Fenix tarea 12. “Plantas Energéticamente sostenibles”.

[16] B.W. Ang, T.F. Fwa, T. T. Ng, Analysis of process energy use of asphalt mixing plants, Energy 18 (7) (1993) 769–777.

[17] D Peinado, M. de Vega, N. Garcia-Hernando, C. Marugan-Cruz, Energy and exergy analysis in an asphalt plant's rotary dryer, Applied Thermal Engineering 31 (6-7) (2011) 1039-1049.

[18] K. Nishida, T. Takagi, S. Kinoshita, Analysis of entropy generation and exergy loss during combustion, Proceedings of the Combustion Institute 29 (2002) 869–874.

[19] S. K. Som, A. Datta, Thermodynamic irreversibilities and exergy balance in combustion processes, Progress in Energy and Combustion Science 34 (2008) 351–376

[20] Entregable: “FENIX PAV ENT 12.3 APROVECHAMIENTO ENERGETICO” del proyecto Fénix, Tarea 12 “Plantas energéticamente sostenibles”.

CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS BITUMINOSAS SEMICALIENTES

AUTORES

Santiago Gil (Ditecpesa), José Luis Peña (Agrupación Fénix AIE), Fco. Javier Suárez (Ditecpesa), Ramón Botella (UPC), Elsa Sánchez (UNICAN).

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo tecnológico de las mezclas asfálticas fabricadas a baja temperatura (mezclas templadas y semicalientes) ha venido impulsado, fundamentalmente, por la concienciación medioambiental existente en el conjunto de la sociedad.

Las ventajas que aportan este tipo de mezclas son evidentes en el corto plazo y desde un punto de vista local: menores consumos de combustibles, reducción de emisiones de gases con efecto invernadero, mayor seguridad para los trabajadores, etc.

Pero para evaluar la sostenibilidad de un proceso ó tecnología debemos tener en cuenta todos los eslabones que componen su "ciclo vital" [1]. Además es importante que las mezclas asfálticas semicalientes presenten unas características mecánicas y una durabilidad similar a las mezcla en caliente.

Hay numerosas procesos y aditivos comerciales para la fabricación de mezclas semicalientes, aunque se pueden agrupar en distintas tecnologías basadas en diferentes fundamentos físico-químicos:

1. Aditivos que modifican la viscosidad del betún: ceras [2,3]. Este grupo de aditivos modifica la reología del betún; de tal modo que a altas temperaturas (> 100 ºC) la viscosidad del ligante resultante disminuye sensiblemente, permitiendo por lo tanto, una reducción de la temperatura de fabricación del aglomerado.

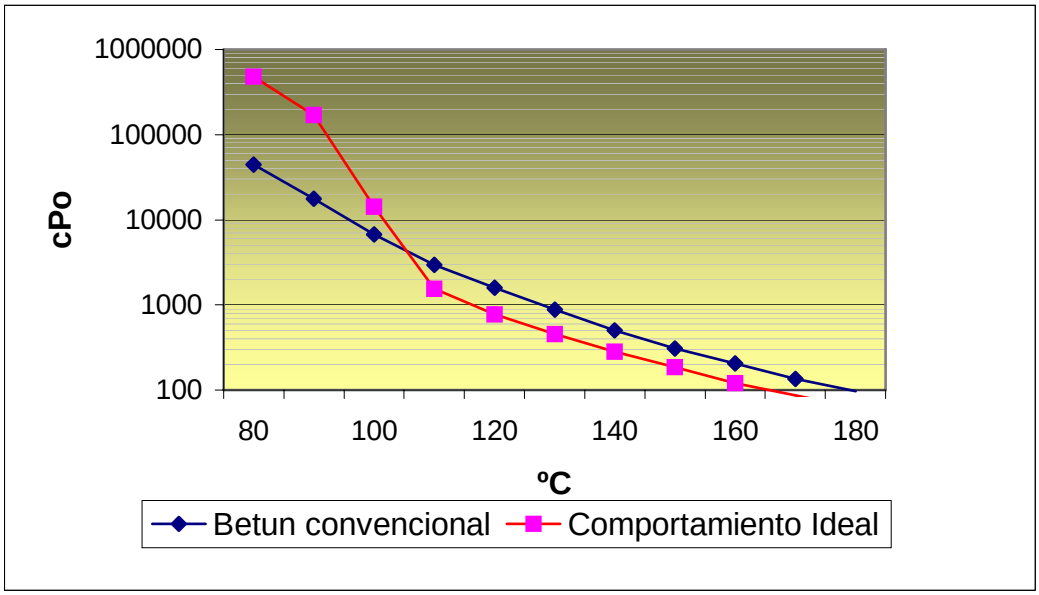


Figura 1. Efecto del empleo de ceras sobre la viscosidad del betún

2. Aditivos basados en la formulación de tensoactivos que ayudan al buen recubrimiento de los áridos reduciéndola tensión superficial árido/betún, disminuyendo el ángulo de contacto entre el betún y el árido (Figura 2). Este grupo de aditivos químicos pueden también actuar como "lubricantes" mejorando la trabajabilidad de la mezcla [4].

Figura 2. Mejora del ángulo de contacto mediante empleo de tensoactivos

3. Procesos que aumentan la superficie específica del ligante mediante la formación de espuma de betún. Para conseguir esta espuma se puede incorporar agua y aire a presión, arena húmeda ó aditivos tipo Zeolita.

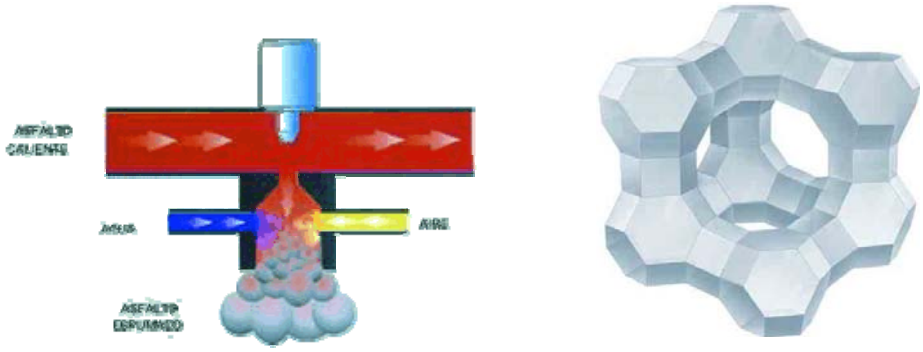


Figura 3. Proceso de espumación con agua y aire a presión y estructura química de una zeolita.

2. DESARROLLOS

2.1 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE LIGANTES

El desarrollo de distintas tecnologías semicalientes pone de manifiesto las deficiencias que tienen los ensayos que convencionalmente se vienen empleando sobre ligantes. Por ejemplo no tiene sentido realizar ensayos de viscosidad ó penetración para poner de manifiesto el por qué un betún aditivado con tensoactivo permite reducir las temperaturas de trabajo. En el proyecto Fénix se han aplicado nuevos ensayos y técnicas que permiten conocer por que funcionan las distintas tecnologías semicalientes existentes; y poder evaluar con estudios sobre ligantes (inicialmente) en qué medida estos van a permitir reducir las temperaturas de trabajo.

Por ejemplo para ligantes semicalientes basados en la tecnología que emplean ceras como modificadores del betún se ha comprobado que la combinación de las técnicas: Reología (DSR - Dynamic Shear Rheometer) y Calorimetría (MDSC – Modulated Differential Scanning Calorimetry) permite obtener una información muy valiosa de lo que ocurre en químicamente en el betún cuando añadimos estas ceras y los comportamientos reológicos que estos cambios van a implicar [2]. Pero además es importante realizar estas medidas después de someter a estos ligantes a procesos de envejecimiento (RTFOT y PAV) para poder evaluar que es lo que verdaderamente estamos incorporando a nuestras carreteras [3].

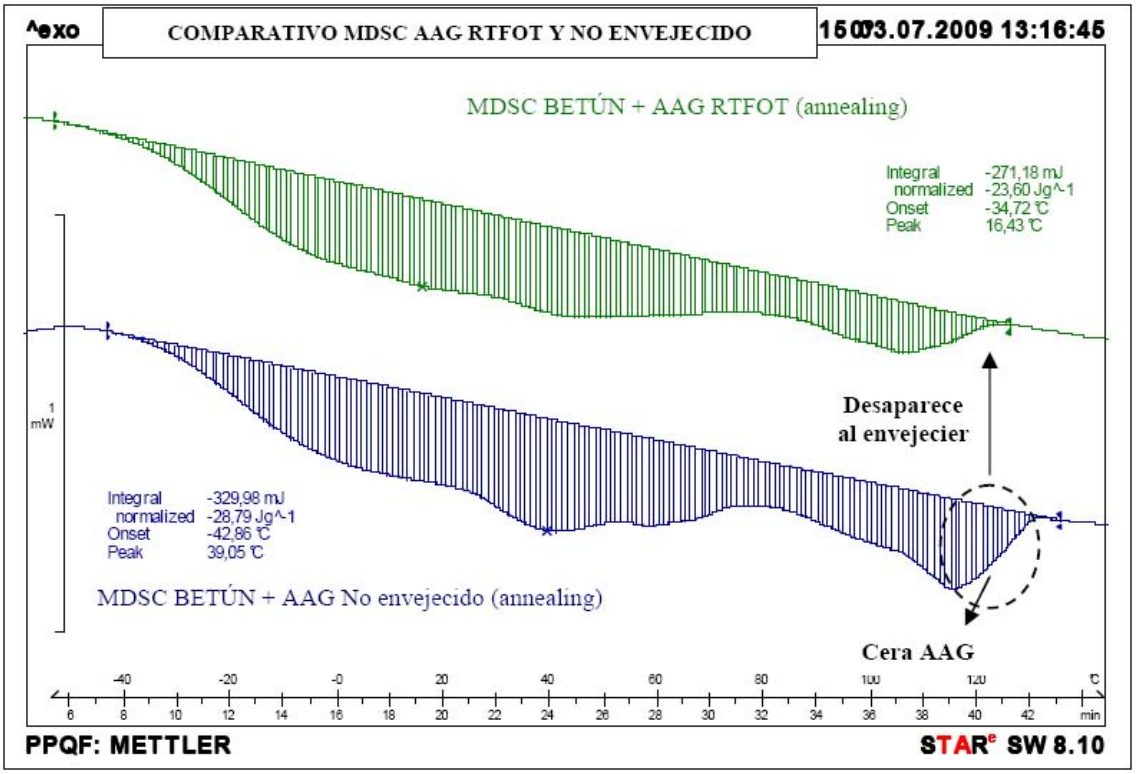


Figura 4. MDSC de Betún + cera AAG envejecido por RTFOT y no envejecido.

Para el caso de betunes a los que se han adicionado tensoactivos se han realizado medidas de ángulos de contacto a temperaturas de fabricación de las mezclas semicalientes, para poder evaluar si la adición de estos modifican la tensión superficial del betún y en qué medida lo hacen [4]. Para ello lo que se ha empleado es un Goniómetro como equipo de medida.

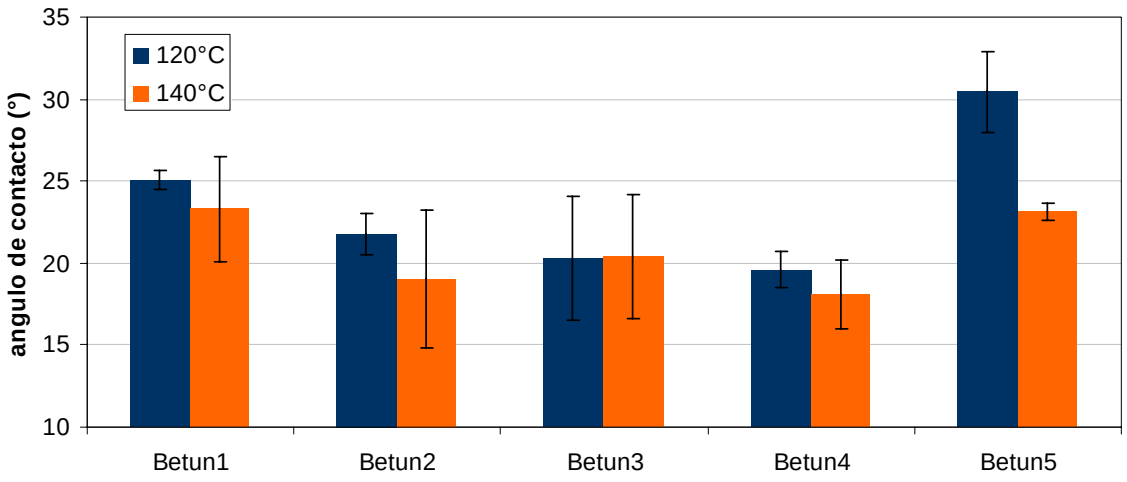


Figura 5. Medidas de los ángulos de contacto de los diferentes betunes después de un tratamiento térmico a la temperatura indicada.

Sin embargo para las tecnologías que utilizan microespumación, como por ejemplo el empleo de zeolitas, lo que se han realizado son isotermas de absorción-desorción de agua de distintos compuestos con una estructura química adecuada para ello; para poder predecir la cantidad de agua capaz de absorber y a qué velocidad se va a liberar esta en una mezcla asfáltica [5].

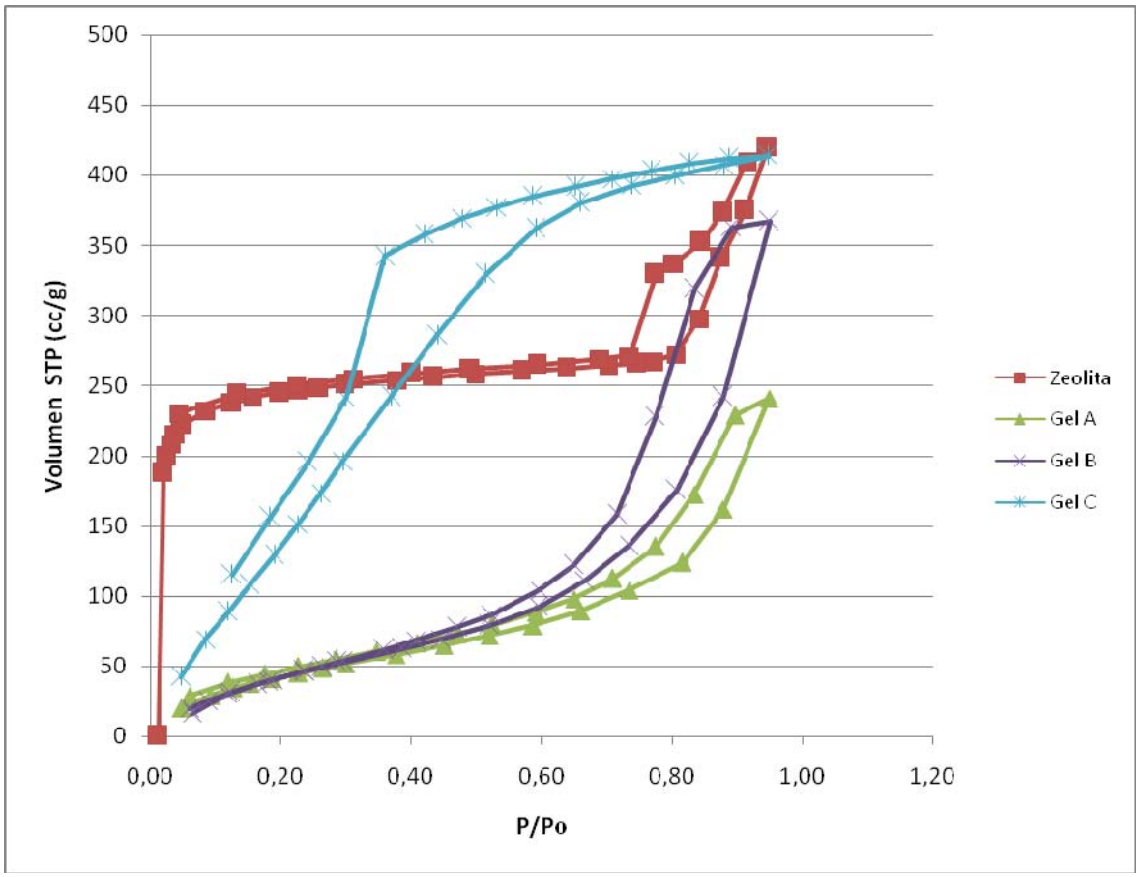


Figura 6. Isotermas de adsorción-desorción en agua a 25°C.

2.2 ENERGÍAS DE COMPACTACIÓN

Un parámetro muy importante y que debemos tener en cuenta en las mezclas semicalientes es la temperatura mínima de compactación. Además de que una tecnología semicaliente permita reducir las temperaturas de fabricación del aglomerado, debe de permitir reducir la temperatura de compactación. Si esto no es así y la horquilla [Tª de fabricación – Tª de compactación] fuese muy pequeña, no sería posible ejecutar esta mezcla semicaliente cuando la mezcla asfáltica puede perder mucha temperatura en su puesta en obra (grandes distancias desde la planta de fabricación hasta el extendido, baja temperatura ambiental, etc.)

Para poner de manifiesto que las tecnologías semicalientes pueden ser compactadas a una menor temperatura se ha empleado el compactador giratorio. Este equipo permite conocer la evolución de la curva de densidad durante el proceso de compactación.

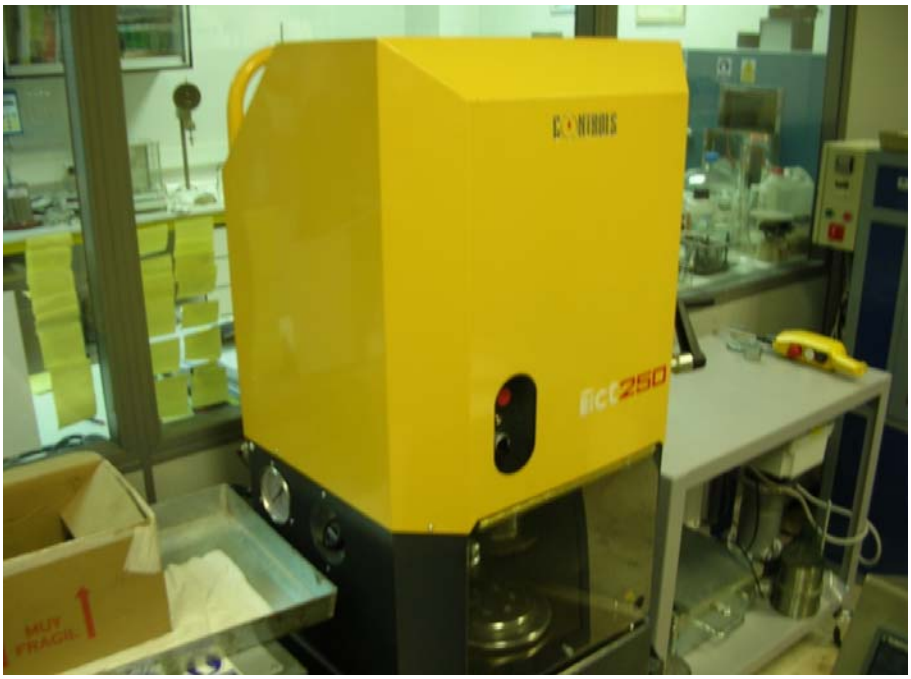


Figura 7. Compactador Giratorio

Un método que se puede emplear para evaluar con qué facilidad se puede compactar una mezcla asfáltica es la medida del coeficiente CEI (Compaction Energy Index). Basándose en los resultados obtenidos de las curvas de densificación de las diferentes mezclas, estos parámetros analizan cuanto de fácil es compactar una mezcla frente a otra [6]. El índice CEI analiza los resultados obtenidos desde el giro 8 hasta alcanzar el 92% de la densidad máxima.

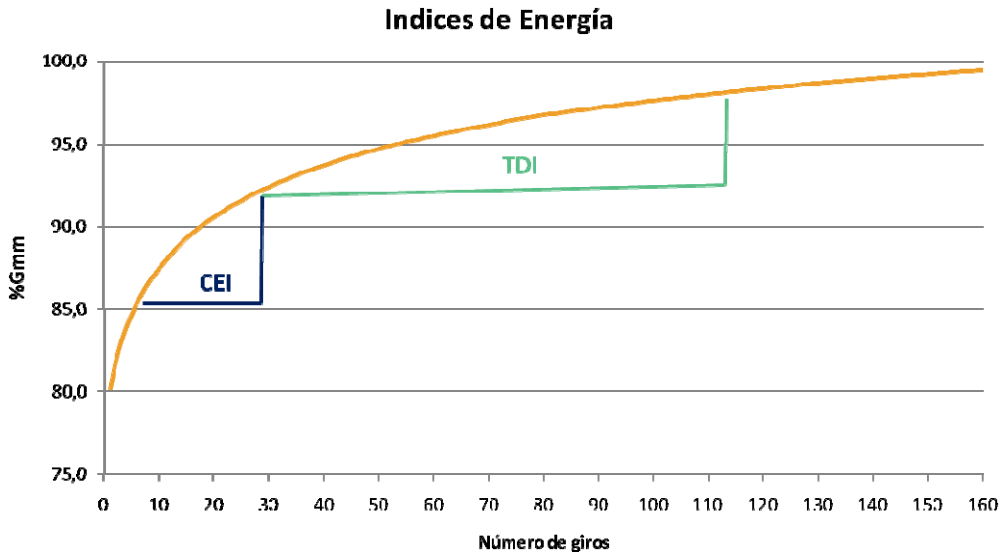


Figura 8. Medida de los coeficientes CEI y TDI analizando las curvas de compactación

Además en el Proyecto Fénix hemos realizado un análisis similar, pero tomando como referencia medidas a las que estamos más habituados [7]. Para ello hemos evaluado la energía de compactación como el área bajo la curva de compactación (densidad frente al nº de giros) entre las siguientes densidades:

- 90 % de la densidad Marshall: se analiza la energía a partir de esta densidad que puede ser aproximadamente la densidad que tiene una mezcla asfáltica a la salida de la extendedora.
- 98 % de la densidad Marshall: se analiza la energía de compactación hasta esta densidad ya que se puede considerar como una densidad fin del proceso de compactación en una puesta en obra.

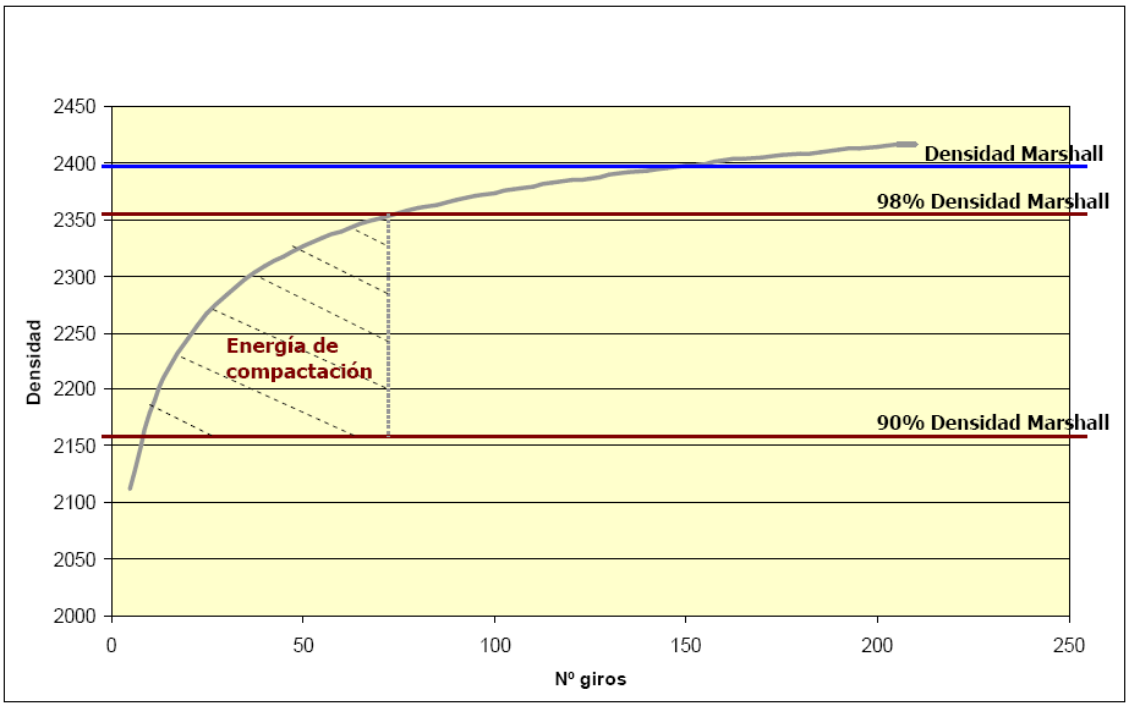


Figura 9. Método empleado para el cálculo de las energías de compactación.

Luego esta energía así calculada trata de emular la energía necesaria para compactar una mezcla asfáltica desde que ésta sale de la extendedora hasta que alcanza la densidad adecuada.

Con ambas metodologías de análisis se ha puesto de manifiesto que las mezclas semicalientes necesitan una menor energía de compactación, siendo por lo tanto más fácilmente compactables respecto a las mezclas en caliente a una temperatura dada. A continuación se muestran algunos resultados obtenidos:

➢ De acuerdo al parámetro CEI [4,5]:

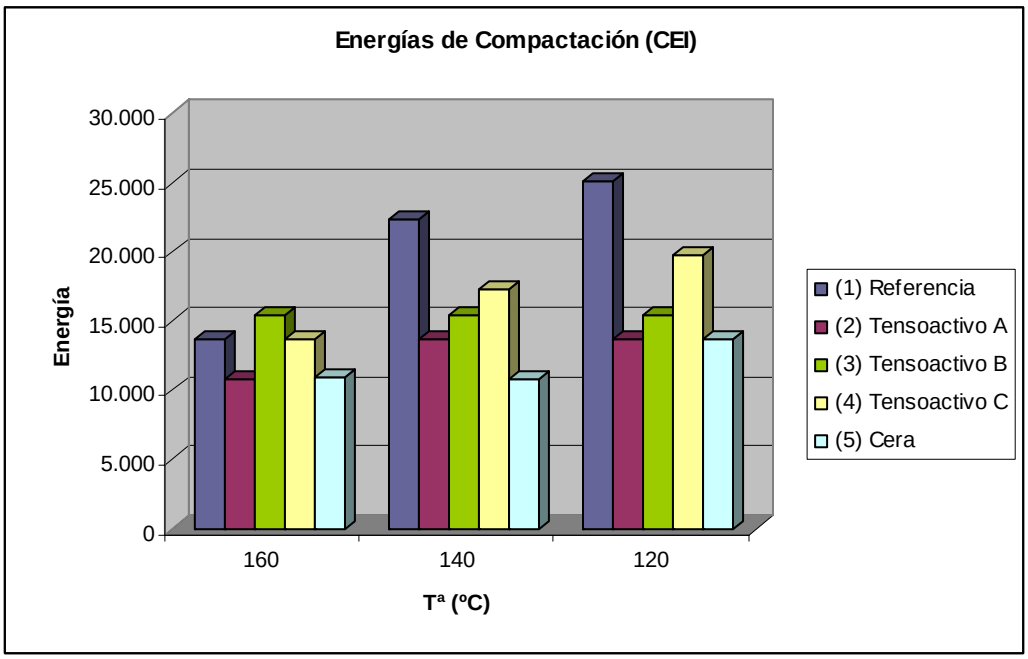


Figura 10. Representación de las energías de compactación (CEI) a distintas temperaturas (tensoactivos y cera).

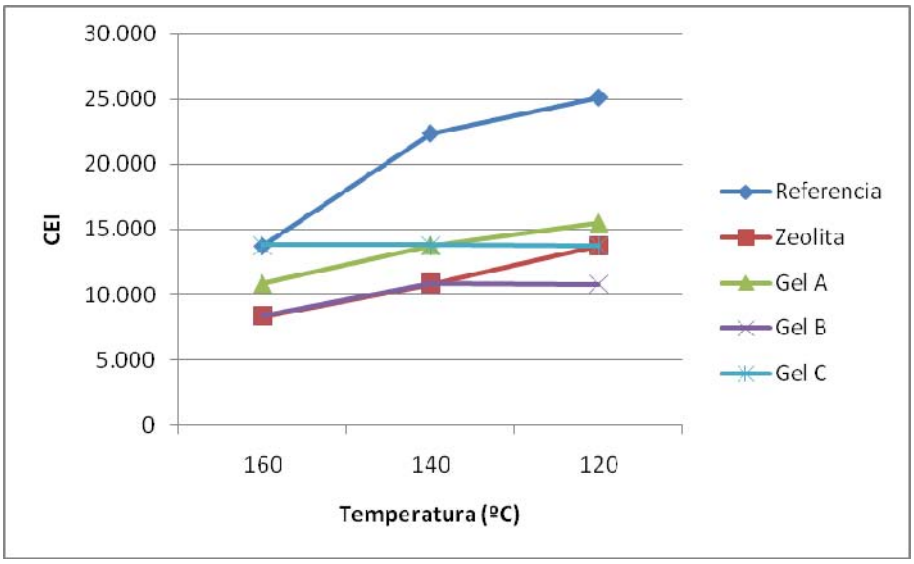


Figura 11. Resultados de índice de energía (CEI) a distintas temperaturas (Zeolitas).

- De acuerdo al parámetro energía entre 90 y 98% de la densidad Marshall [7]:

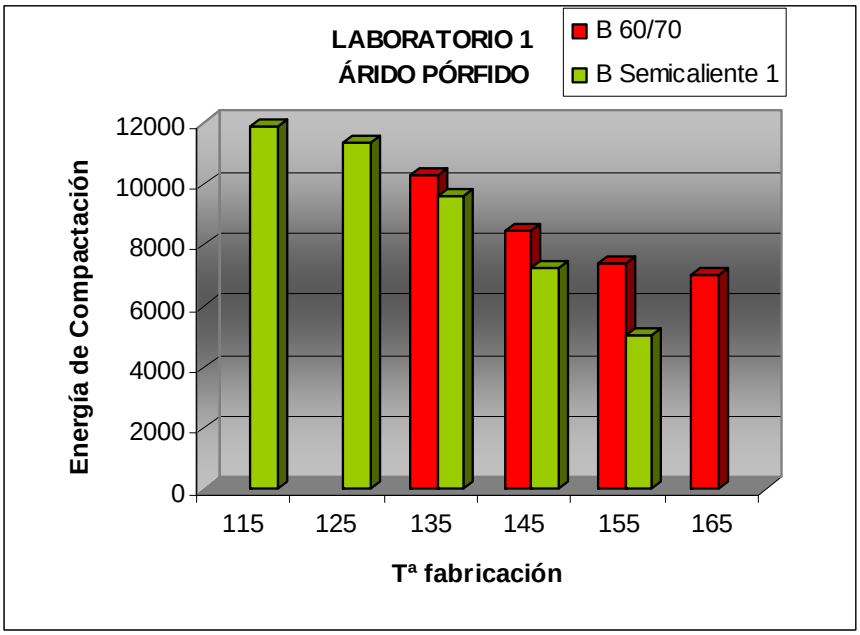


Figura 12. Energías de compactación para las mezclas estudiadas en el Laboratorio 1, con árido porfídico y betún semicaliente 1 (basado en ceras)

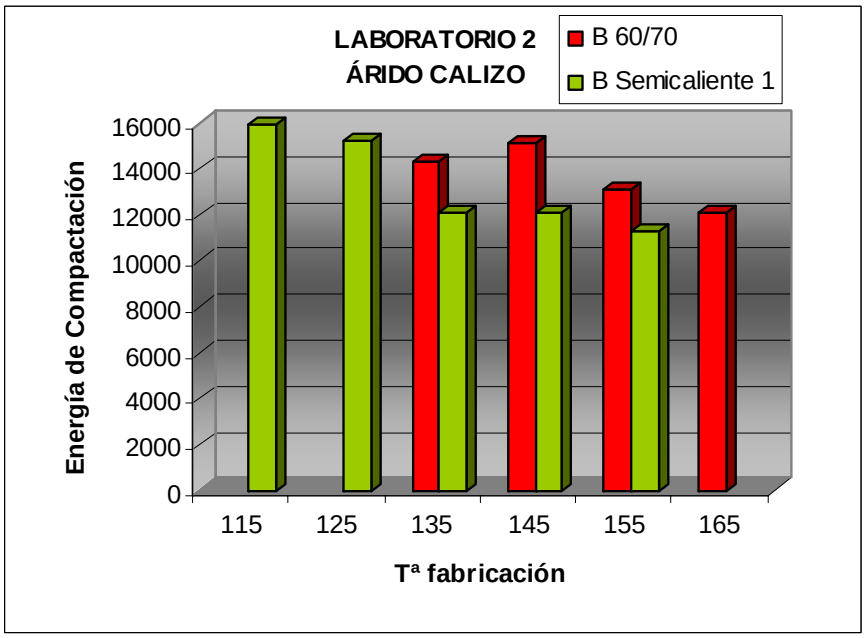


Figura 13. Energías de compactación para las mezclas estudiadas en el Laboratorio 2, con árido calizo y betún semicaliente 1 (basado en ceras)

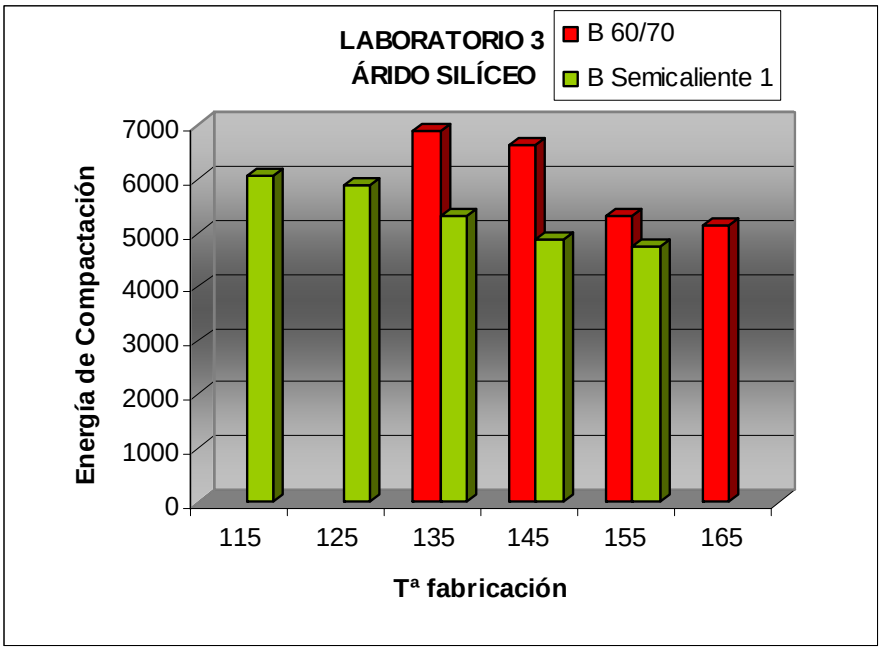


Figura 14. Energías de compactación para las mezclas estudiadas en el Laboratorio 3, con árido silíceo y betún semicaliente 1 (basado en ceras)

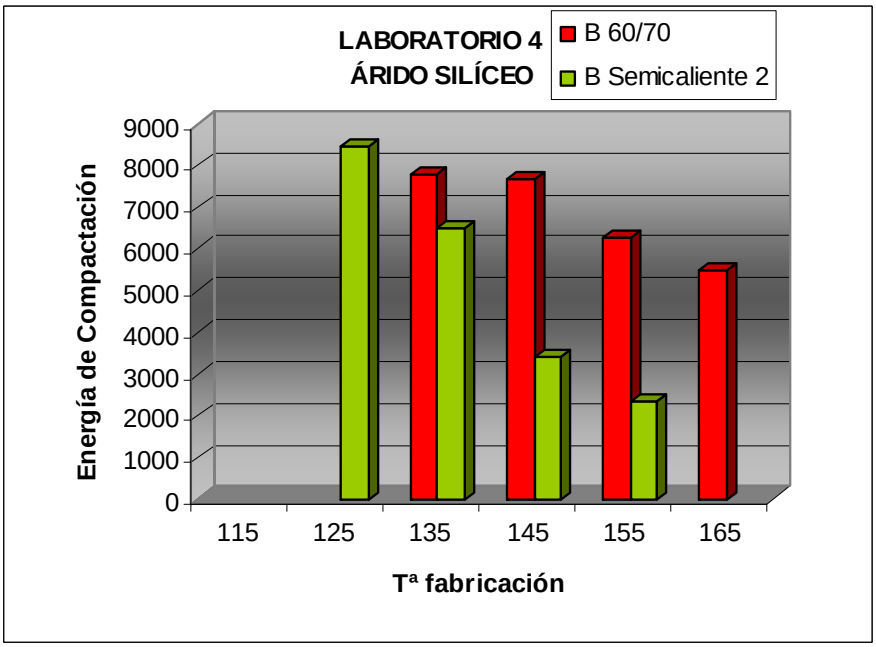


Figura 15. Energías de compactación para las mezclas estudiadas en el Laboratorio 4, con árido silíceo y betún semicaliente 2 (basado en tensoactivos)

3. ENSAYOS MECÁNICOS SOBRE MEZCLAS ASFÁLTICAS

Es importante que este tipo de mezclas además de presentar unas ventajas medioambientales, de acuerdo a la reducción de las temperaturas de fabricación, tengan unas propiedades mecánicas similares a sus homólogas en caliente.

Para evaluar estas propiedades se han realizado distintos ensayos sobre mezclas semicalientes compactadas a distintas temperaturas comparándolas con una mezcla de referencia convencional [8]. Se pueden destacar los siguientes resultados:

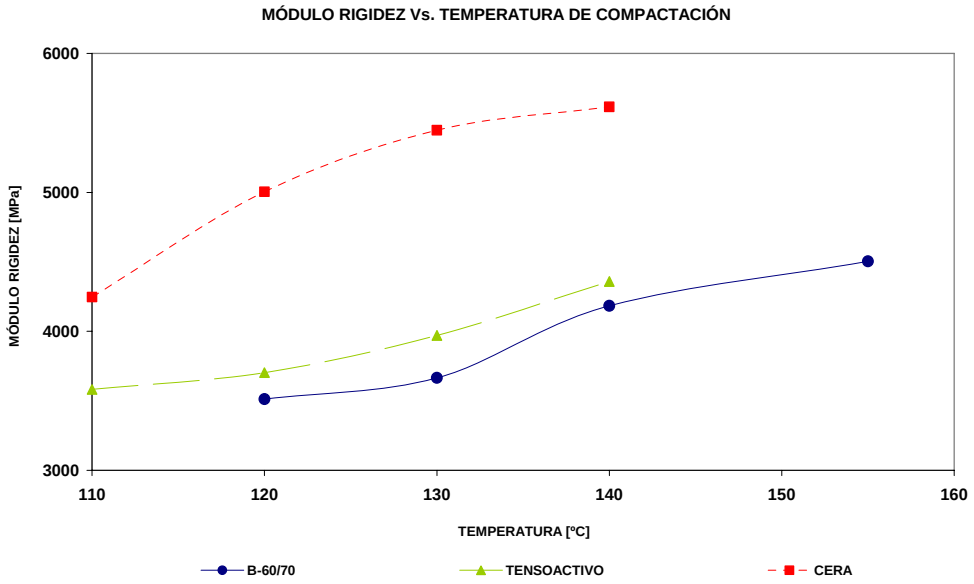


Figura 16. Módulo de rigidez de las mezclas semicalientes y calientes.

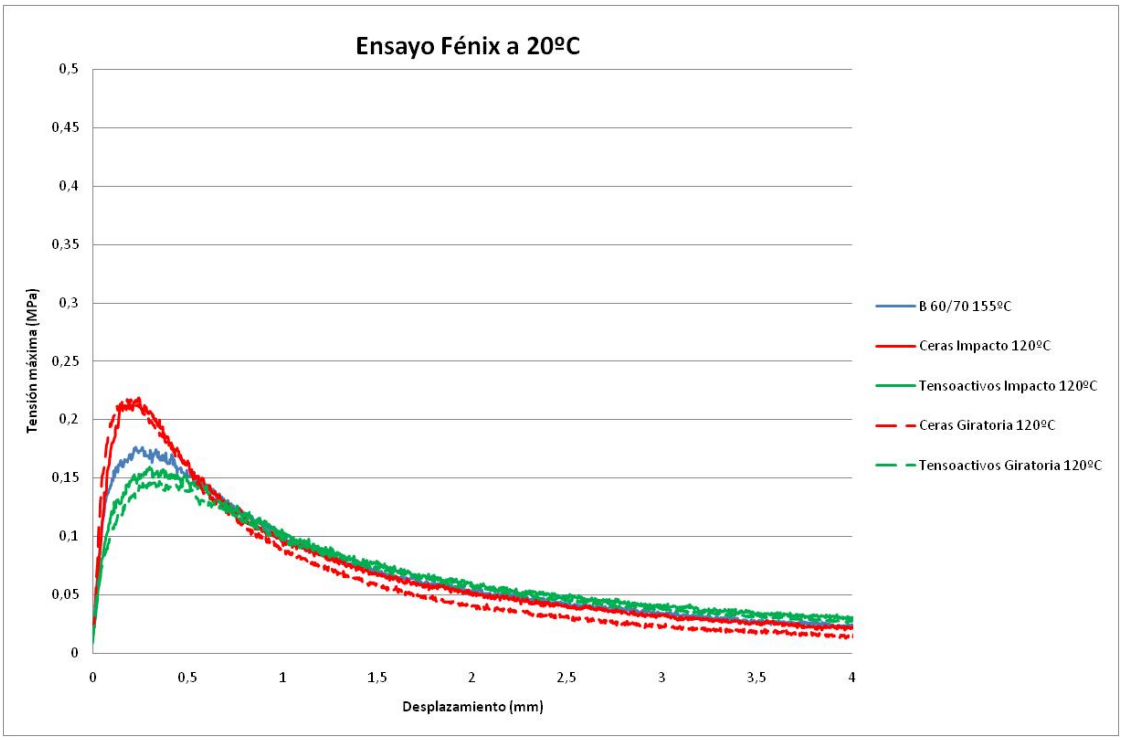


Figura 17. Curvas obtenidas en el ensayo Fénix.

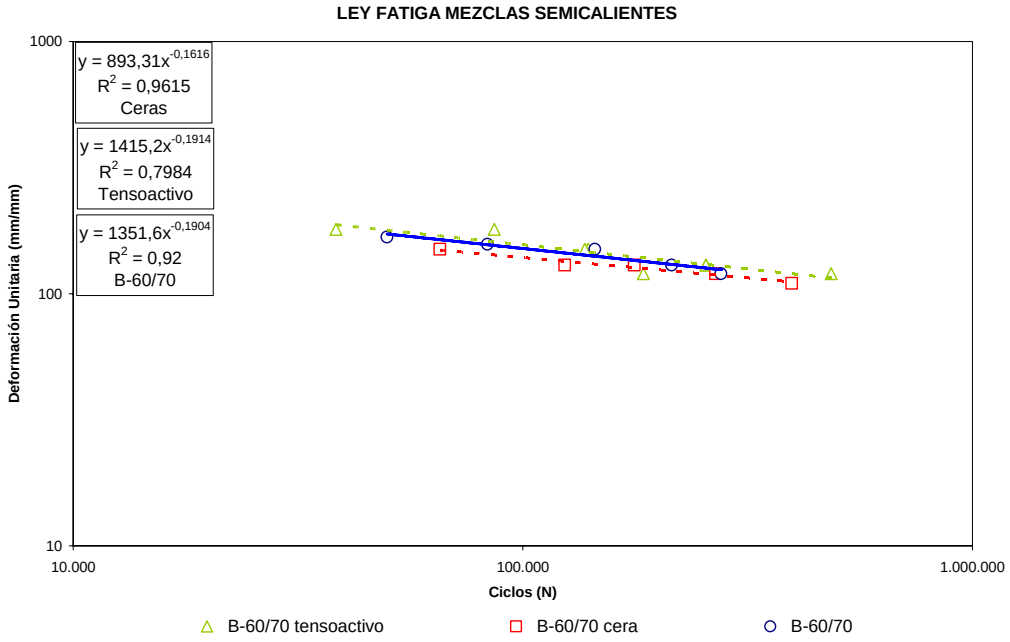


Figura 18. Leyes de fatiga de las mezclas semicalientes y calientes.

La mezcla que emplea ceras como tecnología semicaliente obtuvo mayores resistencias y módulos denotando así una mayor rigidez a la temperatura de ensayo, mientras que la mezcla fabricada con tensoactivos obtuvo valores similares a los obtenidos por la mezcla de referencia. Respecto al ensayo Fénix, se puede observar como la mezcla que emplea ceras presenta una mayor tenacidad pero una menor ductilidad comparado con la mezcla de referencia y la que emplea tensoactivos. Por último, el comportamiento a fatiga, evaluado según el ensayo de fatiga a flexotracción en cuatro puntos, no mostró diferencias entre las mezclas ensayadas.

También se han realizado ensayos de sensibilidad al agua para distintos mezclas semicalientes fabricadas a distintas temperaturas [4,5 y 7].

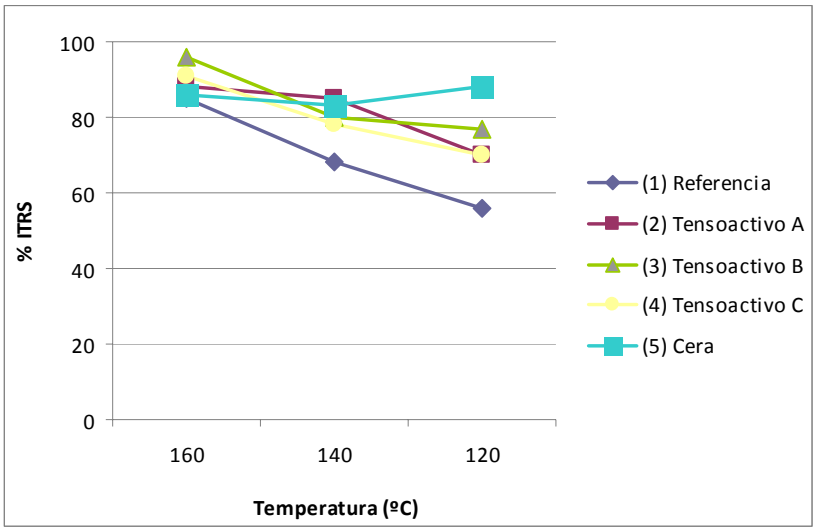


Figura 19. Resistencias conservadas para los distintos ligantes a diferentes temperaturas de trabajo (tensoactivos y cera)

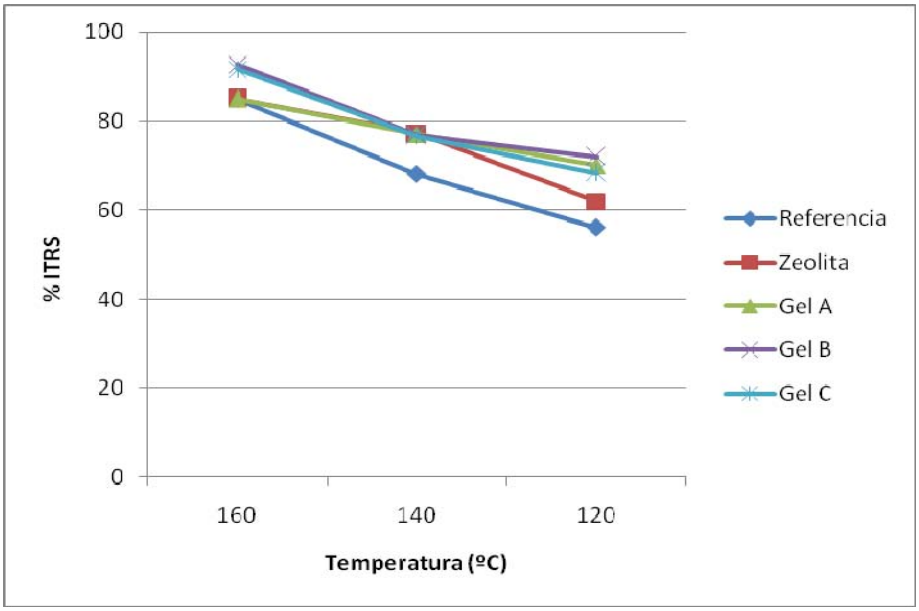


Figura 20. Resultados de sensibilidad al agua (zeolita y geles de sílice).

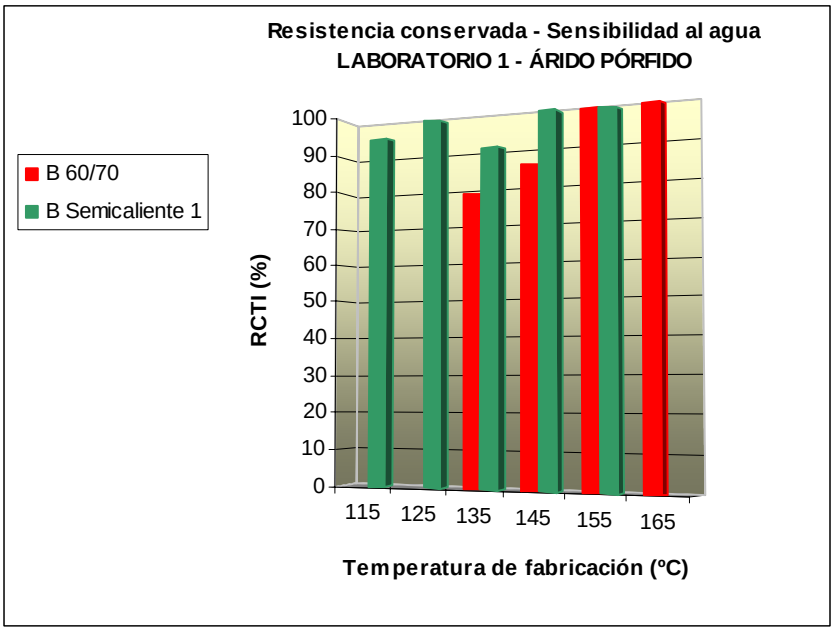


Figura 21. Valores de la resistencia conservada. Árido pórfido + betún semicaliente con ceras.

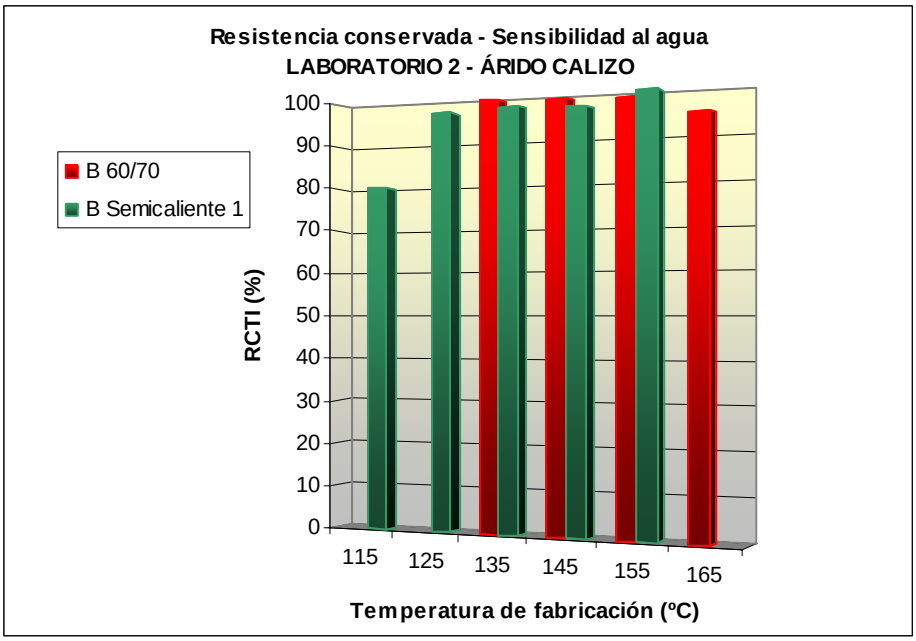


Figura 22. Valores de la resistencia conservada. Árido calizo + betún semicaliente con ceras.

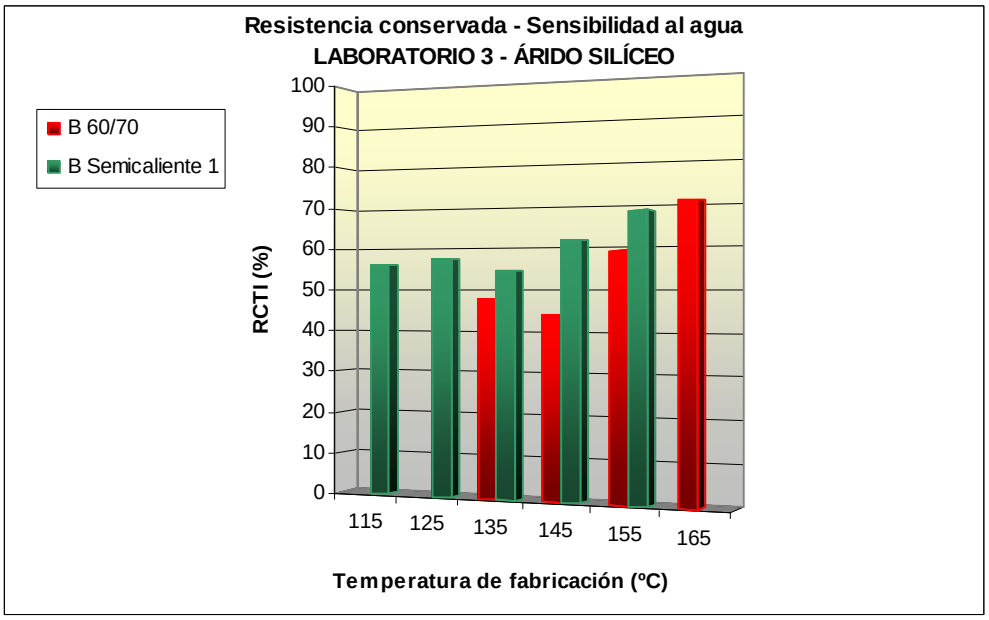


Figura 23. Valores de la resistencia conservada. Árido silíceo + betún semicaliente con ceras

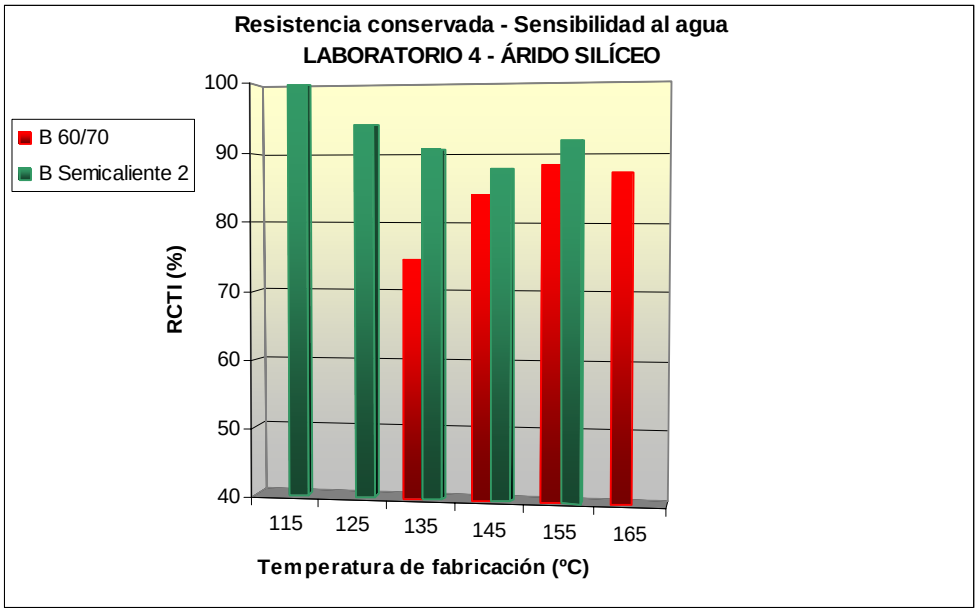


Figura 24. Valores de la resistencia conservada. Árido silíceo + betún semicaliente con tensoactivos

A la vista de los resultados obtenidos, podemos afirmar que de manera habitual se obtienen valores de resistencia conservada más bajos cuando disminuimos las temperaturas de fabricación de las mezclas asfálticas. También podemos destacar que el empleo de técnicas semicalientes minimiza este efecto. De todos modos cuando trabajamos con un árido que puede presentar deficiencias en este ensayo es recomendable evaluar el comportamiento de la mezcla semicaliente frente a la sensibilidad al agua debido a las bajas temperaturas de fabricación tal y como hemos visto. En ocasiones el empleo de tensoactivos puede llegar a mejorar esta propiedad sobre todo cuando empleamos áridos de naturaleza silícea.

Aunque no se muestran los resultados, se han encontrado como los valores de resistencia a tracción indirecta, tanto para mezclas convencionales como sus homologas semicalientes, disminuyen al disminuir las temperaturas de fabricación, pese a llegar a densidades similares. Esto puede deberse, en cierta medida, a la menor oxidación/envejecimiento, que sufren los ligantes, al ser trabajados a menores temperaturas. Por lo tanto estamos poniendo en la mezcla final un betún menor duro (menos envejecido) que presenta una menor resistencia. Por ello sería interesante evaluar cuanto menor es esta oxidación y poder partir de ligantes semicalientes más duros inicialmente, que casi con toda seguridad, darán lugar a mezclas más resistentes a tracción indirecta y con mayores módulos de rigidez.

4. CONCLUSIONES

Existen en el mercado distintas tecnologías semicalientes para las cuales se han desarrollado diferentes ensayos, previos a la fabricación de las mezclas asfálticas, para evaluar la eficacia de estas:

- Empleo de técnicas reológicas y caloriméticas cuando empleamos ceras como técnica semicaliente.
- Empleo de medidas de ángulos de contacto, mediante el empleo de un goniómetro, cuando empleamos tensoactivos.
- Empleo de mediadas de isotermas de adsorción y desorción de agua cuando empleamos zeolitas.

Mediante el empleo del compactador giratorio se ha podido evaluar como las distintas técnicas semicalientes estudiadas demandan una menor energía de compactación respecto a sus homólogas convencionales. Este hecho se ha puesto de manifiesto tanto analizando índices de compactación CEI como estudiando el área bajo la curva de densidad entre las densidades 90 y 98% de la densidad Marshall.

Se han evaluado distintas propiedades mecánicas de las mezclas semicalientes, obteniendo valores similares a los encontrados en las mezclas en caliente. Si bien es cierto que el disminuir las temperaturas de fabricación da lugar a mezclas con un menor módulo de rigidez y menor resistencia a tracción indirecta. Esto es debido a que estas mezclas al fabricarse a menor temperatura se oxidan menos, por lo que el ligante final en mezcla es más blando de lo que sería al ser fabricado a las temperaturas de las mezclas en caliente. Este hecho se podría solventar partiendo de betunes más duros cuando empleamos tecnologías semicalientes.

No cabe duda que estas tecnologías presentan una ventaja medioambiental respecto a las mezclas en caliente, aunque para evaluar la sostenibilidad de estas tecnologías debemos tener en cuenta todos los eslabones que componen su “ciclo vital”. Es decir analizar mediante el ACV como se fabrican estos aditivos, su transporte, etc. además de caracterizar propiedades fundamentales que se puedan asociar a su durabilidad.

5. REFERENCIAS

[1] Mezclas asfálticas fabricadas a baja temperatura. ¿Cómo evaluar su sostenibilidad? J. Felipo, J. R. López, R. Irusta, A. Moral, N. Sánchez, J. J. Potti, J. L. Peña. 16 IRF 2010.

[2] Estudio de los aditivos que permiten reducir la viscosidad del ligante a elevadas temperaturas. S. Gil, J.I. Amor, J. Felipo, A. Costa, C. Cortés, A. Páez, F. Valor, J.J. Potti. IV Jornada Nacional de Asefma 2009.

[3] Estudio mediante las técnicas DSR y DSC/MDSC de ligantes modificados con ceras sometidos a envejecimiento RTFOT y PAV. S. Gil, F.J. Suárez, J.J. García, J.M. Martínez, M.P. Matía, A. Torrejón, J.L. Novella. V Jornada de Asefma 2010.

[4] Estudio del ángulo de contacto de betunes y su efecto sobre distintas propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas. S. Gil, J.A. González, E. Sánchez. V Jornada de Asefma 2010.

[5] Empleo de Geles de Sílice como Zeolitas para la fabricación de Mezclas Semicalientes. S. Gil, E. Sánchez. VI Jornada de Asefma 2011.

[6] Assessment of Workability/Compactability of Warm Mix Asphalts. Bennert, T., Reinke, G., Mogawer, W. y Mooney, K. TRB Washington enero 2010.

[7] Energías de Compactación de las Mezclas Semicalientes. S. Gil, J. Loma, J.R. López, F. J. Barceló, C. Cortés. VI Jornada de Asefma 2011.

[8] El proyecto Fénix en la UPC. Mezclas semicalientes. O. J. Reyes, F. E. Pérez, R, Miró, J. Amorós, S. Gil.

MEDIDA Y MINIMIZACIÓN DEL RUIDO PRODUCIDO POR EL TRÁFICO RODADO

MEDIDA Y MINIMIZACIÓN DEL RUIDO PRODUCIDO POR EL TRÁFICO RODADO

ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES ACÚSTICAS DE LAS MEZCLAS POROSAS Y DISCONTINUAS PARA CAPAS FINAS

AUTORES

Andrés Costa Hernández (Elsan), José Andrés González Ganso (Cidaut), Santiago Expósito Paje (LA^{2}IC de UCLM), Moisés Bueno Pacheco (LA2IC de UCLM) y Carlos García Serrada (Collosa).

1. INTRODUCCIÓN.

La exposición de la población al ruido ambiental producido por las actividades humanas ha aumentado de forma espectacular en las últimas décadas extendiéndose en el tiempo y en el espacio. Se estima que durante los últimos veinte años la cantidad total de energía acústica emitida al medio ambiente se ha doblado en países industrializados. Este aumento está estrechamente ligado al incremento de la densidad de población en las zonas urbanas, a la mecanización de la mayor parte de las actividades y a la creciente utilización de los medios de transporte de personas y mercancías.

Un aspecto de la contaminación acústica que se debe considerar por ser el que contribuye en mayor medida al ruido ambiental, es el de los emisores acústicos difusos, tales como los medios de transporte (tráfico rodado, ferroviario y aéreo) y los emplazamientos industriales.

Recientes estimaciones indican que más del 20% de los ciudadanos de la Unión Europea (aproximadamente 80 millones, de los cuales 9 millones son españoles) están expuestos a niveles de ruido considerados inaceptables por expertos sanitarios y científicos de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y que del orden de 170 millones de europeos habitan en zonas donde dichos niveles son lo suficientemente altos como para producir serias molestias. Diferenciando por fuentes de emisión sonora, el 18% de la población se ve afectada por el tráfico rodado, mientras que el 1.7% por el ferroviario y el 1% lo hace por el aéreo.

Además de las alteraciones en la calidad de vida, se han advertido contraproducentes efectos en la salud y el bienestar como pueden ser dolores y fatigas, migrañas, efectos influyentes en la conducta social (agresividad), alteraciones en el sueño, problemas cardiovasculares, respuestas hormonales (estrés), efectos sobre el metabolismo (nutrición) y sobre el sistema inmunológico.

En la actualidad se puede destacar que el reconocimiento del derecho a un medio ambiente sonoro adecuado es ya indiscutible y está fundamentado en el derecho internacional, en el europeo y en el español.

Para conocer la situación más exacta de la situación, en cuanto a la exposición global al ruido ambiental en Europa, en el año 2002 se publicó la Directiva 2002/49/CE, de 25 Junio de 2002, sobre evaluación y gestión del ruido ambiental. Su primer objetivo fue crear un marco común en la Unión Europea para la evaluación y gestión de la exposición al ruido ambiental, mediante diversas acciones, entre la que se encuentran la armonización de los índices de ruido y métodos de evaluación, la presentación de datos armonizados en mapas estratégicos de ruido, la elaboración de planes de acción y la publicación de toda la información sobre el ruido ambiental disponible y de los resultados que se fueran obteniendo.

Dentro de la legislación española existen algunos derechos fundamentales reconocidos en la Constitución sobre la protección frente a la contaminación acústica. Para hacer efectiva esta protección, la Ley 37/2003 del Ruido, de 17 de noviembre de 2003, constituye la norma básica de carácter general y ámbito estatal reguladora de este fenómeno, siendo su objetivo la prevención, vigilancia y reducción de la contaminación acústica (ruido y vibraciones) para evitar y reducir los daños que de esa puedan derivarse para la salud humana, los bienes o el medio ambiente. Con la finalidad de desarrollar la ley de ruido y completando aquellos aspectos de la directiva 2002/49/CE que no fueron acogidos en la Ley se han publicado los siguientes reales Decretos: R.D. 1513/2005, R.D. 1367/2007 y R.D. 1371/2007.

En general, como ya se ha comentado, la contribución más importante a la contaminación acústica en zonas urbanas e incluso en zonas rurales procede del tráfico viario. Por ello se están realizando grandes esfuerzos para proteger a la población del ruido que este medio de transporte genera. En zonas urbanas, en donde las fuentes de ruido y los edificios residenciales están muy cercanos, la utilización de las barreras acústicas no es una solución posible y adecuada en numerosas ocasiones. En estos casos, actuaciones reductoras sobre la fuente generadora de ruido viario pueden ser más efectivas y más económicas.

De acuerdo con la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD) el umbral de molestia se encuentra en 55 dB(A) en términos de niveles medios de ruido, siendo el umbral de ruido inaceptable sólo 10 dB(A) mayor, es decir, 65 dB(A).

Gracias a la legislación y a los progresos tecnológicos, el ruido procedente de coches se ha reducido en un 85% desde 1970 y el originado por los camiones en un

90%. A pesar de ello, no se ha conseguido la reducción del ruido viario soportado, debido al crecimiento indiscriminado del parque automovilístico, el cual ha contrarrestado estos avances tecnológicos.

La principal fuente generadora de ruido de un vehículo de forma aislada, procede de la interacción neumático/pavimento, en un intervalo de velocidades que va desde aproximadamente 30-50 Km/h hasta por encima de los 130 Km/h para el parque automovilístico actual. A este tipo de ruido, también denominado de rodadura, que depende directamente de la velocidad del vehículo, contribuyen directamente tanto la superficie de la vía como el neumático del vehículo. Por esto, el Libro Verde (1996) señalaba que cualquier actuación frente al ruido viario debía centrarse en el ruido de rodadura y la promoción de pavimentos silenciosos.

En esta línea, diversas directivas europeas han definido el análisis de los niveles de ruido, sus limitaciones y su reducción. Exigiendo unas determinadas prestaciones acústicas a la hora de evaluar cualquier nuevo tipo de vehículo o neumático, que entre en el mercado europeo, para la obtención del correspondiente certificado de calidad.

El mayor problema que aparece es el hecho de que una capa de rodadura no se trata de un producto fabricado en serie. En este caso la evaluación acústica debe ser determinada esencialmente por medio de características superficiales, las cuales tendrán una gran dependencia de las condiciones de la fabricación y de la puesta en obra. Por lo tanto, clasificar o etiquetar este producto requiere procedimientos especiales, basados en métodos específicos de medida que tienen que ser desarrollados, validados y normalizados antes de establecer un sistema común de clasificación europeo.

Desde hace ya bastantes años, el sector de la carretera viene aportando avances tecnológicos en el campo de firmes menos ruidosos. Se están desarrollando nuevos tipos de pavimentos denominados sono-reductores, con bajo impacto acústico sobre el medio ambiente, que permiten controlar y reducir la emisión del ruido de rodadura, particularmente molesto en tramos de carretera urbanos, y que además son capaces de absorber una mayor parte del ruido de la interacción neumático/pavimento y del ruido mecánico. La influencia de la superficie de rodadura puede llegar a los 9 dB si comparamos una superficie porosa (características sono-reductoras) y ciertas superficies densas y cerradas.

Tradicionalmente, la elección del tipo de pavimento se ha basado en la seguridad y la durabilidad; ahora bien, cada vez más, el comportamiento acústico está siendo un factor a considerar al elegir el pavimento o capa de rodadura en la construcción de la carretera o en la rehabilitación del firme.

2. RUIDO DE RODADURA.

El ruido debido al tráfico rodado es la suma de los distintos tipos de emisiones procedentes de cada una de los vehículos que circulan por una misma carretera. Cada vehículo tiene diferentes fuentes de emisión que combinadas dan el nivel total

del ruido generado por un vehículo. Las distintas fuentes de ruido asociadas a la emisión de los vehículos son las siguientes:

- Propulsión del vehículo, en las que interviene el motor, la transmisión, el sistema de admisión y escape de gases, los frenos y la suspensión.
- Ruido aerodinámico o de turbulencias originado por la interacción de la carrocería del vehículo y el aire. Depende de la forma de la carrocería y aumenta con la velocidad. Se suele medir en túneles de viento, con el motor parado, con objeto de estudiar específicamente esta fuente de ruido.
- Ruido de rodadura originado por la interacción del neumático con la superficie de la carretera.

Es preciso desarrollar un alto conocimiento de las variables que influyen en todas las fuentes para poder controlarlas. Tanto la generación como la propagación del ruido pueden verse muy afectados por factores meteorológicos como la lluvia, el viento y la temperatura.

Tabla 1. Contribución al ruido total con un pavimento de mezcla bituminosa convencional.

<table>
<tr><th rowspan="2">Fuente de Ruido</th><th colspan="2">v = 50 Km/h</th><th colspan="2">v = 80 km/h</th></tr>
<tr><th>Vehículos ligeros</th><th>Vehículos pesados</th><th>Vehículos ligeros</th><th>Vehículos pesados</th></tr>
<tr><td>Motor</td><td>20-50%</td><td rowspan="2">10-80%</td><td rowspan="5">15-35%</td><td rowspan="5">50-70%</td></tr>
<tr><td>Transmisión</td><td>5-35%</td></tr>
<tr><td>Tubo de escape</td><td>15-35%</td><td>20-60%</td></tr>
<tr><td>Ventilador/radiador</td><td>0-30%</td><td>0-65%</td></tr>
<tr><td>Admisión/escape</td><td>10-35%</td><td>0-10%</td></tr>
<tr><td>Rodadura</td><td>10-15%</td><td>10-15%</td><td>65-85%</td><td>30-50%</td></tr>
</table>

Un factor importante que influye directamente en la generación del ruido producido por el tráfico rodado es la velocidad del vehículo. Como norma general se puede indicar que para los vehículos ligeros actuales circulando hasta 40 Km/h, la influencia en la generación del ruido es predominantemente de tipo mecánico, siendo el ruido de rodadura a velocidades superiores. Este límite es de 70-80 Km/h para vehículos pesados. En la tabla 1 se muestran porcentajes de contribución al ruido total con un pavimento de mezcla bituminosa convencional.

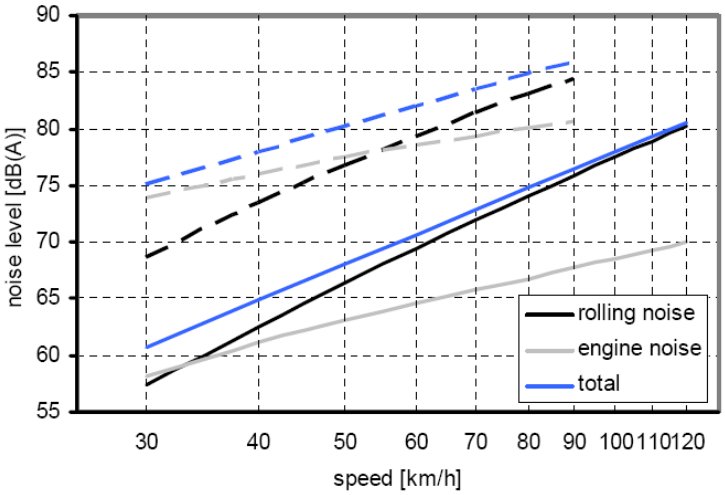


Figura 1. Contribuciones respectivas del ruido de propulsión (engine noise) y del ruido de rodadura (rolling noise) en vehículos ligeros (línea continua) y vehículos pesados (línea discontinua).

Para situaciones donde existe tráfico congestionado y los vehículos no circulan con fluidez a una velocidad constante, la contribución de la propulsión en el ruido global se hará más importante, por lo que, en estas condiciones, los beneficios acústicos de los denominados pavimentos sono-reductores se verán reducidos.

Otro factor importante que influye directamente en el ruido de rodadura es el tipo de neumático empleado. El esfuerzo de los fabricantes de neumáticos en los últimos años se ha multiplicado con el fin de conseguir compaginar la seguridad, tanto en condiciones de carretera seca como con lluvia (hidroplaneo), la reducción de consumo energético en la rodadura, la reducción del ruido generado y la durabilidad. Entre las características del neumático más significativas que influyen en la generación de ruido de rodadura se pueden encontrar:

- El efecto de la rigidez del compuesto de la goma de la banda de rodadura, de los flancos y de las bandas de refuerzo del neumático.
- El efecto de la profundidad del relieve y la distribución de canales (conviene una distribución aleatoria para frecuencias muy marcadas).
- El ancho de banda de rodadura (+0.3 dB(A)/cm).
- La presión de inflado y la carga por eje. Ambos factores originan mayor rigidez estructural y por tanto mayor nivel de ruido.
- La velocidad de rotación del neumático.

Se puede concluir que el ruido de rodadura es resultado de una compleja interacción entre el neumático y la superficie de rodadura. Como ya se ha comentado, es la mayor causa del ruido de tráfico, particularmente en vehículos que circulan a velocidades medias y altas. Con el objetivo de diseñar pavimentos más silenciosos es necesario conocer los mecanismos que gobiernan la generación y propagación de este tipo de ruido. Los mecanismos de generación de ruido de rodadura se suelen clasificar en dos grupos: vibratorios y aerodinámicos.

Los mecanismos vibratorios comprenden los impactos y la adhesión neumático-pavimento. Las vibraciones se deben al choque del relieve del neumático contra el pavimento; son vibraciones locales tanto normales como tangenciales con respecto al eje de giro del neumático. Suelen ser la causa de las emisiones de ruido a bajas frecuencias (<1000Hz) y son importantes en el caso de superficies de rodadura rugosas (alta macrotextura).

Los mecanismos aerodinámicos (air pumping) corresponden al bombeo del aire debido a la compresión y expansión del aire atrapado en las cavidades originadas en la zona de contacto limitadas por la banda de rodadura del neumático y la superficie del pavimento. Estos mecanismos son responsables del incremento y reducción del ruido de rodadura. Principalmente están compuestos por el efecto diedro (bocina), el efecto de la impedancia acústica (comunicación de cavidades entre pequeñas cámaras de aire y tubos) y la resonancia toroidal de la carcasa del neumático. Estos mecanismos son los responsables de las frecuencias medias y altas (>1000Hz) del ruido de rodadura. El nivel de ruido producido en el bombeo de aire aumenta cuando las superficies de las capas de rodadura son lisas y disminuyen cuando son rugosas dentro de un cierto límite que corresponde a macrotexturas con longitud de onda $\lambda \leq 10$ mm.

La propagación del sonido no se realiza nunca sin pérdidas, sino que está supeditada siempre a una mayor o menor amortiguación

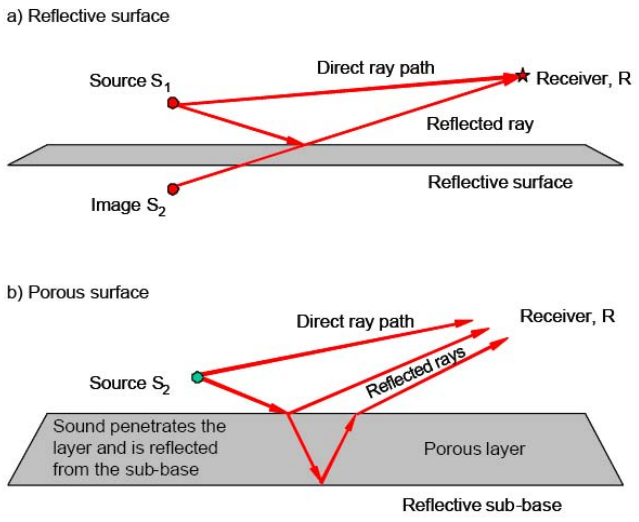


Figura 2. Propagación de ondas acústicas.

El sonido reflejado por la carretera puede interferir con el sonido propagado directamente. Cuando una onda sonora impacta contra una superficie puede reflejarse con casi la totalidad de la energía incidente; esto es lo que venía ocurriendo con los pavimentos convencionales (mezclas cerradas y densas). El efecto del suelo es diferente cuando se trata de superficies acústicas duras o blandas. Si la superficie es porosa, la onda sonora penetra en el material por los poros, pierde una parte de energía en los intercambios térmicos y viscosos con el esqueleto rígido del material, se refleja en la superficie con la capa interior, si esta fuese reflectante, y vuelve en sentido inverso con una energía menor. La atenuación del suelo se calcula en bandas de frecuencia, para tener en cuenta el contenido frecuencial de la fuente de ruido y el tipo de terreno entre la fuente y el receptor. Se puede decir por lo tanto que las interferencias dependen directamente de tipo de pavimento y del ángulo de incidencia de la onda reflejada. Una de las consecuencias de la suma de diversas reflexiones puede ser la amplificación del sonido.

3. PAVIMENTOS SONO-REDUCTORES.

3.1 INTRODUCCIÓN.

En los últimos años al diseñar y construir el firme de una carretera, se ha seguido el criterio de colocar en las capas de base e intermedia mezclas bituminosas resistentes, capaces de soportar las cargas verticales transmitidas por el tráfico durante el periodo de vida establecido. Por otro lado, en la capa de rodadura o pavimento se coloca un material o tratamiento capaz de resistir los esfuerzos tangenciales y de torsión producidos por el trafico y con muy poca aportación a los esfuerzos verticales, pero que suponga una superficie de rodadura lo más cómoda y segura posible para el usuario. Se presta especial atención a las características superficiales de la misma: TEXTURA, RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO, REGULARIDAD SUPERFICIAL y CAPACIDAD SONO-REDUCTORA. Los tratamientos y mezclas, para la capa de rodadura, se han concebido para su aplicación en capas generalmente muy delgadas y empleando materiales de muy alta calidad.

Intentando obtener el punto óptimo entre resistencia al deslizamiento y ruido, se han realizado numerosos trabajos de investigación de los que se concluye que, teniendo en cuenta las mezclas utilizadas actualmente, los pavimentos más sono-reductores son los construidos con mezclas porosas y los de capas finas a base de mezclas discontinuas en caliente.

Uno de los mayores problemas que se pueden encontrar es el hecho de que un pavimento no es un producto prefabricado. Las propiedades acústicas estarán directamente relacionadas con las superficiales y éstas, a su vez, dependerán del acabado conseguido después de la fabricación y puesta en obra. Por lo tanto, para clasificar o etiquetar productos se requieren procedimientos especiales basados en

métodos específicos que tiene que desarrollarse, validar y normalizar antes de obtener un sistema de clasificación armonizado para todos los miembros Europeos.

3.2 MEZCLAS DRENANTES.

Las mezclas drenantes o porosos (Porous Asphalt, PA en la denominación de la norma UNE EN 13108-7) se han desarrollado para conseguir una capa de rodadura capaz de absorber el agua de lluvia, eliminando el agua superficial que se interpone entre el neumático y el pavimento. Estas mezclas están diseñadas para tener un elevado contenido de huecos, por lo general de 20 a 25%, muchos de los cuales están interconectados, gracias a las granulometrías típicas de las mismas.

Posteriormente y como consecuencia de varios trabajos de investigación, se vio la capacidad de estas mezclas para absorber parte del ruido generado por la rodadura de los vehículos, lo que aumentó aún más su empleo haciendo de ellas uno de los materiales de carreteras con desarrollo más espectacular de los últimos veinticinco años. Han marcado un nivel de características superficiales que no existía hasta que aparecieron, y que ahora sirve de modelo para nuevos desarrollos. Como dato llamativo, en Holanda aproximadamente el 60% de las carreteras de su red estatal están formadas por mezclas porosas.

Sus ventajas principales son las ya señaladas de eliminación del agua en momentos de lluvia, lo que redunda en la eliminación del hidroplaneo (aquaplaning) y de las salpicaduras.

Otra de las ventajas de estos tipos de pavimento es la mejora de la visibilidad al evitar la reflexión de la luz incidente. Con lluvia se produce con facilidad la reflexión de la luz sobre los pavimentos lisos e impermeables. Al eliminar los pavimentos drenantes el agua de la superficie del firme, se eliminan también los fenómenos de reflexión de la luz y mejoran notablemente las condiciones de visibilidad del conductor. Por otra parte, los huecos que presenta la mezcla contribuyen a resaltar la señalización horizontal.

Como ya se ha resaltado, otra de las ventajas de este pavimento, a la que cada vez se le está dando más importancia, es que ofrece una rodadura silenciosa. En los pavimentos densos un aumento de macrotextura supone un aumento del nivel sonoro, mientras que estos pavimentos, a igual textura, son más silenciosos e incluso tiene capacidad para absorber parte del ruido del motor.

En muchos proyectos la reducción de ruido es la característica más apreciada en las mezclas drenantes. Son unos de los materiales más efectivos en la reducción de ruido en frecuencias altas, mientras que en bajas frecuencias no hay mucha diferencia. La reducción con respecto a rodaduras convencionales se encuentra generalmente entre 2 y 6 dB(A). Para una buena absorción, es muy importante la accesibilidad y distribución de los “tamaños” de los huecos ya que son la cámara de expansión del aire atrapado entre neumático y pavimento. Los tamaños menores de árido favorecen la reducción de ruido. Por otro lado, el incremento de la emisión de ruido con la velocidad es menor que con otros materiales. Una mezcla drenante con

tamaño máximo del árido comprendido entre 6 y 16 mm., para velocidades altas, puede reducir el nivel de ruido en 4 dB(A).

Cuanto mayor es el tamaño del árido más grandes son los huecos y mayores los diámetros de los conductos de comunicación entre poros, aunque por contra, se podría producir un aumento de la generación del ruido de rodadura. Así, al aumentar el tamaño máximo del árido empleado de 8 a 11 mm o de 11 a 16 mm, se podría producir un incremento de ruido de 2 dB(A).

No existe una regla general que relacione el tamaño del árido con el ruido de rodadura, ya que depende también de un factor muy importante como es la textura.

La reducción de ruido producida por una capa de rodadura drenante respecto a una capa densa del mismo espesor, depende de su espesor y del porcentaje de huecos (Descomet, 1988):

$$\Delta L = 0.005 \cdot n \cdot e$$

siendo:

ΔL = reducción del ruido, dB(A)

n = huecos en mezcla, %

e = espesor de la capa de rodadura, mm

Esto quiere decir que se puede obtener una reducción significativa de ruido, del orden de 4 dB(A), si se emplea una capa drenante de 4 cm de espesor y un porcentaje de huecos superior al 20%.

Una variante muy interesante de las mezclas porosas son los denominados pavimentos porosos de doble capa (DPAC) que fueron desarrollados en Holanda a principios de la década de los 90. Están basados en la construcción de mezclas drenantes en doble capa. Se utiliza una capa superior muy delgada (de 2 a 3 cm.) con mezcla bituminosa de tamaño de árido 4/6 mm, que consiguen una superficie regular y disminuyen el ruido, y otra inferior de 4 a 5 cm de espesor, con tamaño máximo del árido de 10/14 mm. La capa superior actúa como filtro de la suciedad evitando o minimizando la colmatación de la capa inferior. La segunda capa tiene una capacidad de drenaje mayor que los pavimentos porosos convencionales lo que hace mejorar la propiedad de evacuación de agua.

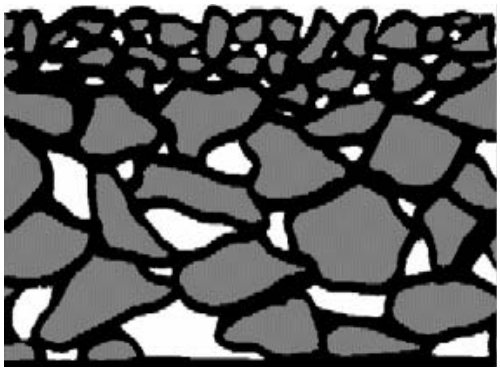


Figura 3. Esqueleto de una mezcla porosa de doble capa.

Este tipo de mezclas se están utilizando ya en varios países europeos (Países Bajos, Dinamarca, Italia) y en Japón, alcanzándose reducciones de ruido de 2 dB más que con las drenantes convencionales de una capa. Esta reducción es consecuencia, en parte, del pequeño tamaño de árido utilizado en la capa superficial por el cual se reduce las vibraciones de los neumáticos así como el ruido que producen.

La doble porosas son probablemente los pavimentos más silenciosos que están en uso actualmente. Estas mezclas combinan una textura superficial óptima con una buena absorción del ruido en el apropiado intervalo de frecuencias (500-1000 Hz) debido a su alto contenido en huecos (20-30 %). El ruido se podría llegar a reducir hasta 6 dB para vehículos ligeros a una velocidad de 50 km/h.

El espesor total de las capas aumenta de los 4 a 5 cm típicos de las porosas de una capa a 6 a 7cm en este caso. El resultado de este aumento de espesor lleva consigo un traslado del máximo de absorción en el espectro de frecuencias de 600 a 800 Hz. Este desplazamiento resulta excelente para pavimentos en entornos urbanos.

Con estas dos características principales (acción filtrante y reducción de ruido) se obtiene un pavimento sono-reductor que resiste mejor uno de los principales problemas de colmatación encontrados en los pavimentos porosos simples. Aun en el caso de velocidades de tráfico bajas, típicas del tráfico en áreas urbanas, las absorciones acústicas de los pavimentos drenantes bicapa son superiores a las monocapa, por lo que es más aconsejable que la utilización de una sola capa porosa.

3.3 MEZCLAS DISCONTINUAS EN CALIENTE PARA CAPAS DE RODADURA DELGADAS Y ULTRADELGADAS.

Las mezclas asfálticas tipo discontinuas, prescritas en la normativa española en el Artículo 543 del vigente Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3), han mostrado ser una buena solución para capa de rodadura, ya que pueden compactarse en pequeños espesores, presentan una gran macrotextura y, por tanto, una buena resistencia al deslizamiento a velocidades elevadas. Este tipo de mezclas permiten introducir dotaciones elevadas de betún

aumentando su durabilidad sin problemas de formación de roderas. En las granulometrías discontinuas se eliminan los tamaños intermedios (entre 2 mm y 4 mm) que son los que separan los áridos gruesos, manteniendo un fuerte esqueleto mineral de áridos gruesos en contacto entre sí.

Se pueden considerar mezclas de granulometría muy similar a las de las mezclas porosas, con algo más de mortero, fabricadas con ligantes modificados con polímeros o fibras, compactadas con rodillo liso y cuyo acabado presenta un aspecto similar al de una mezcla porosa. Se diferencian en su menor porosidad al haber quedado los huecos rellenos con mástico (betún + finos). Al igual que las mezclas porosas, las mezclas discontinuas proporcionan capas de rodadura de altas prestaciones, con buenas características en cuanto a resistencia a fisuración, resistencia a deformación plástica, durabilidad, sonoridad, comodidad y seguridad. Normalmente son utilizadas como tratamientos en carreteras y calles de poca capacidad de tráfico. Se emplean pequeños tamaños de árido para conseguir espesores menores de 3 cm, conociéndose también como microaglomerados.

Referente al ruido generado, el empleo de microaglomerados de granulometría discontinua permite obtener una superficie de rodadura muy lisa y de macrotextura negativa, consiguiendo una textura óptima, y haciendo que los mecanismos de generación de ruidos se vean amortiguados. Apenas existen excitaciones que produzcan vibraciones o deformaciones de los neumáticos y los fenómenos de compresión y expansión de bolsas de aire se ven disminuidos por la elevada macrotextura del pavimento. Diversas mediciones efectuadas indican reducciones del nivel sonoro de 1,5 a 2 dB(A) con pavimento seco, y de 2 a 5 dB(A) con pavimento mojado, respecto a las mezclas habituales para capas de rodadura, aunque en cualquier caso, no alcanzan el nivel conseguido por las mezclas drenantes. Los mejores resultados se consiguen cuando el tamaño máximo del árido es de 6 mm (capas ultradelgadas).

Las últimas investigaciones están intentando adentrarse en los fenómenos de generación de ruido para el caso de los vehículos pesados. En este campo han aparecido resultados que indican que las capas finas son bastante efectivas para los autobuses, llegando a conseguirse niveles de ruido aproximados a los conseguidos por vehículos ligeros.

Entre las mezclas discontinuas para capas delgadas se pueden incluir las denominadas mezclas SMA (Stone Mastic Asphalt, según la norma UNE EN 13108-5)

En cuanto a las mezclas SMA convencionales, cuando el diseño es adecuado y la fabricación y puesta en obra correctas, este tipo de mezclas presentan excelentes características funcionales, buenas condiciones frente a las deformaciones plásticas y roturas, así como una reducción del ruido y las salpicaduras. Comparándolo con una mezcla densa convencional, esta reduce el ruido generado en más de 3 dB(A) bajo condiciones favorables (textura óptima y pequeño tamaño máximo de árido) Estos tipos de mezcla requieren rigurosos controles de calidad en el diseño y fabricación de la mezcla y áridos de buena calidad.

3.4 OTROS PAVIMENTOS SONO-REDUCTORES.

La utilización de polvo de caucho, procedente de neumáticos fuera de uso, para modificar los ligantes bituminosos usados en la fabricación de mezclas bituminosas en caliente, es una técnica perfectamente desarrollada y que ha aportado, en numerosos trabajos de investigación realizados, conocimientos sobre el efecto positivo que la presencia de este caucho, modificando el ligante o formando parte de la estructura granular de la mezcla, tiene sobre la reducción del ruido de rodadura cuando se utilizan para la construcción de la capa de rodadura de un firme.

Otra línea interesante de estudio es la de los denominados pavimentos poroelásticos (PERS), en las que se incorpora caucho de neumáticos en forma de polvo como parte o único constituyente del árido, y con resinas de poliuretano como ligante, llegando a alcanzar una alto porcentaje de huecos. La elasticidad evita vibraciones, lo que supone otro efecto adicional para la reducción del ruido. Se han conseguido reducciones de ruido de 12 a 15 dB mayores que con las mezclas asfálticas convencionales, pero todavía se tiene que mejorar la resistencia al deslizamiento.

Estos pavimentos fueron inventados por Nilson en la década de los 70 en Suecia. Los primeros ensayos fueron realizados en los 80. El primer experimento relevante fue llevado a cabo en Noruega aunque fue frustrado después de la destrucción del tramo de ensayo durante una fuerte nevada. Desde 1994, en Japón se están realizando investigaciones en este tipo de pavimentos y desde el año 2000 existen colaboraciones internacionales para intentar resolver problemas como la adhesión a la superficie base, resistencia al desgaste, resistencia en condiciones húmedas, costes y resistencia al fuego.

Figura 4. Textura de diferentes tipos de pavimentos poroeláticos.

Los pavimentos poroelásticos tienen un alto contenido de huecos interconectados, lo que facilita la distribución del aire y del agua a través de ellos. Pero a su vez,

poseen elasticidad debido al uso de granulados de goma o fibras (polvo de caucho de neumático, caucho nuevo u otros productos elastoméricos) como principal agregado. Generalmente, este tipo de superficies son diseñadas con un porcentaje en huecos mínimo del 20% en volumen. Como ligante se suele usar poliuretano para mantener la mezcla unida en una proporción de 5-15% en peso. Se utilizan normalmente en espesores de 3-4 cm. En algunas situaciones también puede requerirse un ligante adicional para fijar el material poroelástico sobre la superficie original. Este puede ser el ligante utilizado para la mezcla, aunque normalmente se usan adhesivos especiales basados en resinas epoxi.

Figura 5. *Tramo* PERS de prueba en la ciudad japonesa de Mie (Abril 2004).

Los principales problemas que se han encontrado en este tipo de pavimentos son la pérdida de adhesión con la capa base, el mal comportamiento en condiciones de nieve y su insuficiente resistencia al deslizamiento. Las formulas actuales son todavía bastante caras, debido al alto contenido en productos costosos (resina). Este tipo de superficie está todavía en las etapas experimentales.

4. INFLUENCIA DE LOS PARAMETROS DE DISEÑO DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS EN EL RUIDO DE RODADURA.

Se describe el ruido de rodadura como el generado durante la interacción de dos elementos de distinto origen, el neumático y el pavimento, en el desplazamiento relativo entre ambos. Ambos presentan claras diferencias si tenemos en cuenta el material, el diseño, la tecnología de fabricación, así como la normativa que les afecta.

El ruido de rodadura es un ruido de banda ancha que presenta su máxima contribución en torno al tercio de octava centrado en 1000 Hz. A pesar de tener la contribución principal a esta frecuencia, se caracteriza por presentar más

contribuciones a otras frecuencias, cada una de las cuales se relaciona con cada uno de los mecanismos de generación.

Un aspecto muy importante en el control de la propagación del ruido generado es la absorción acústica del pavimento. El sonido en su proceso de propagación interacciona con el pavimento, reflejando una parte de la energía incidente y absorbiendo otra parte.

La absorción acústica de los materiales es una magnitud extrínseca, es decir, es el resultado de una combinación de parámetros más básicos e intrínsecos al material, como son principalmente: la porosidad, la resistencia al flujo del aire y la tortuosidad.

4.1MEZCLAS POROSAS.

4.1.1 Absorción acústica

Los asfaltos porosos bien diseñados presentan unos valores importantes de absorción acústica en la zona donde es predominante el nivel de ruido de rodadura (800-1600 Hz). Sandberg y Ejsmont advierten de la necesidad de sintonizar el máximo de absorción acústica en función del tipo de vía. Recomiendan para vías de alta velocidad (100 km/h) que el máximo de absorción esté en torno a frecuencias próximas a 1000 Hz, mientras que para carreteras de menor velocidad el máximo de absorción debe situarse en frecuencias próximas a 600 Hz.

A continuación se detalla cómo se debe modificar la composición del pavimento con vistas a conseguir los máximos coeficientes de absorción en las frecuencias de interés.

En el proyecto FENIX, la Fundación CIDAUT a partir de las mezclas fabricadas en el laboratorio de Asfaltos y Construcciones Elsan ha realizado el estudio de la influencia en la absorción acústica de los parámetros de construcción de una mezcla bituminosa en caliente drenante, de las propiedades intrínsecas acústicas (Porosidad, Tortuosidad y Resistividad) y del espesor mediante ensayos experimentales y herramientas de simulación, de forma que se puedan conocer los parámetros de construcción óptimos para la mejora del comportamiento acústico.

El comportamiento acústico (propiedades acústicas extrínsecas como la absorción acústica) de los materiales porosos, es función de su estructura macroscópica, la cual está determinada por las propiedades intrínsecas del material que se relacionan con las propiedades acústicas extrínsecas por medio de complejos modelos matemáticos de comportamiento.

Las propiedades intrínsecas son inherentes al material, es decir, no dependen de la geometría, ni de la frecuencia, ni del espesor, sólo están condicionadas por los parámetros de fabricación y son las que determinan el comportamiento acústico de los materiales. En el caso de los asfaltos los parámetros de fabricación serían la granulometría, el porcentaje de filler, el porcentaje de áridos finos, el porcentaje y tipo de betún, naturaleza del árido, el porcentaje de huecos, etc. En la siguiente

figura se muestra la interrelación que existe entre los dos tipos de propiedades y los parámetros de fabricación:

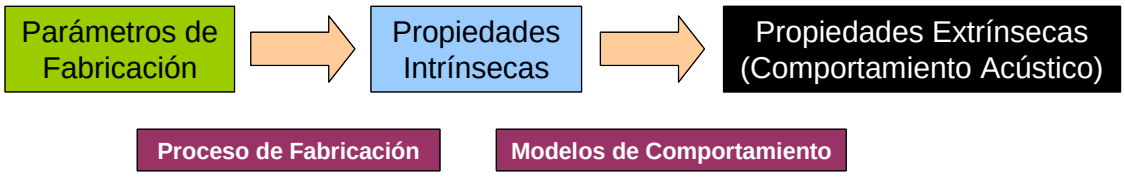


Figura 6. Diagrama de interrelación

Para poder relacionar la absorción acústica con los parámetros de fabricación, en primer lugar se hizo una caracterización experimental de la absorción acústica según la norma EN ISO 10534-2:2001 mediante el tubo de impedancia de muestras de mezclas tipo PA-11:

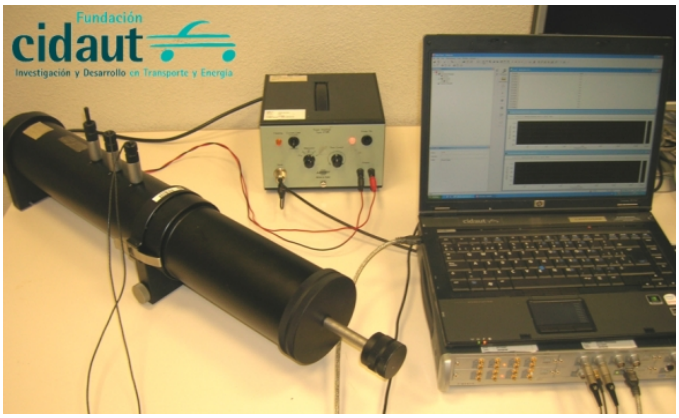


Figura 7. Tubo de impedancia con tubo largo de diámetro 100 mm.

A continuación se representa unas gráficas donde se recoge la variación del coeficiente de absorción acústica máxima con respecto a cada uno de los parámetros de fabricación de las mezclas bituminosas analizados (tipo de betún, porcentaje de betún sobre árido aportado a la mezcla, tipo de árido,...). En las gráficas se representa el valor medio y la desviación, además para poder ver en detalle las tendencias obtenidas, se ha escogido una escala de absorción acústica que varía de 0.6-1.0, en lugar de 0.0-1.0.

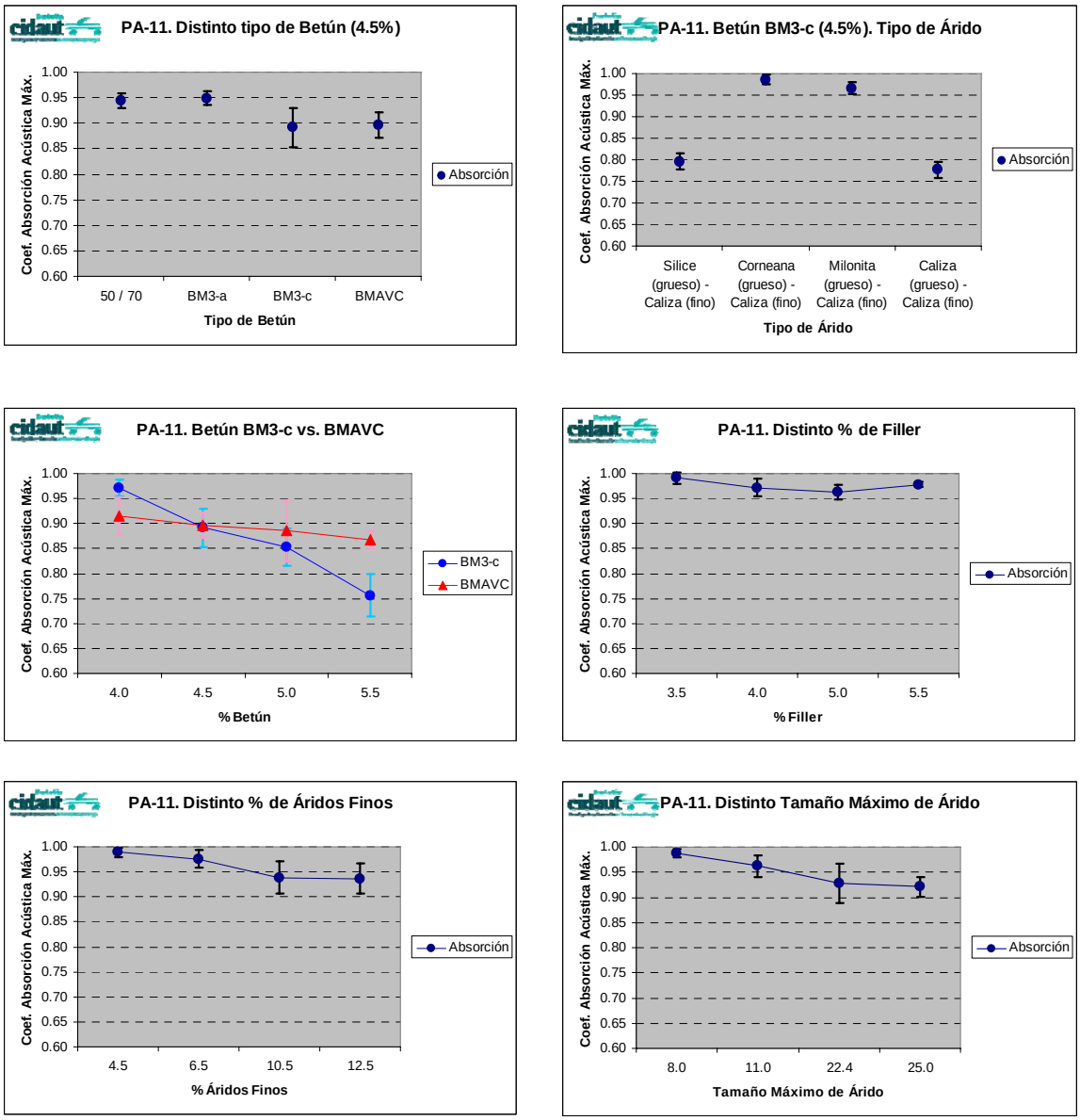


Figura 8. Gráficas donde se representa el coeficiente de absorción acústica respecto a cada uno de los parámetros de fabricación de las mezclas bituminosas analizadas.

A la vista de estos resultados se puede concluir, pero siempre teniendo en cuenta el tipo y número de muestras estudiadas para cada una de las mezclas y la granulometría utilizada, que:

- *Para un mismo porcentaje de betún (4.5%), aunque no existen grandes variaciones de la absorción acústica máxima, se obtienen valores mayores con betunes 50/70 y BM3-a.*

- *Influye mucho la naturaleza de árido, el mejor comportamiento lo presenta el árido de tipo Corneana (árido grueso) – Caliza (árido fino) y el peor el*

árido de tipo Caliza (grueso) – Caliza (fino) y Sílice (grueso) – Caliza (fino). Mejor comportamiento con árido grueso más duro.

- *Al aumentar el porcentaje de betún se reduce la absorción acústica máxima debido principalmente a que se reduce el porcentaje de huecos y porque posiblemente existan menos interconexiones entre los huecos. El efecto es mucho más acusado cuando se emplean betunes tipo BM3-c.*

- *Al variar el porcentaje de filler, manteniendo fijo el resto de la granulometría (87% de áridos gruesos) excepto el porcentaje de áridos finos, tiene poca influencia debido a que se mantiene constante el porcentaje de áridos de tamaño inferior a 2 mm (13%).*

- *Al variar el porcentaje de finos se modificó el porcentaje de áridos gruesos (áridos entre 2 mm y 4 mm), y se mantuvo fijo el porcentaje de filler (4.5%). Al aumentar el porcentaje de finos se reduce el coeficiente de absorción acústica debido a que existe una mayor oclusión, reduciéndose el porcentaje de huecos.*

- *Al cambiar el tamaño de árido máximo, se modificó el porcentaje del resto de áridos mantuvo y se mantuvo constante el porcentaje de áridos inferior a 4 mm. Este tipo de cambio en la granulometría sí que afecta al coeficiente de absorción acústica, aumentándose al reducir el tamaño de árido máximo, debido al aumento del porcentaje de huecos y posiblemente a que los huecos estén interconectados. Otro factor que hay que tener en cuenta es que una reducción del tamaño máximo de árido mejorará la textura de la superficie de rodadura, disminuyendo la generación del ruido de rodadura.*

En las siguientes gráficas se muestran la variación entre el producto de la frecuencia del nivel máximo del coeficiente de absorción acústica por el espesor de la probeta con respecto a cada uno de los parámetros de fabricación de las mezclas bituminosas analizados:

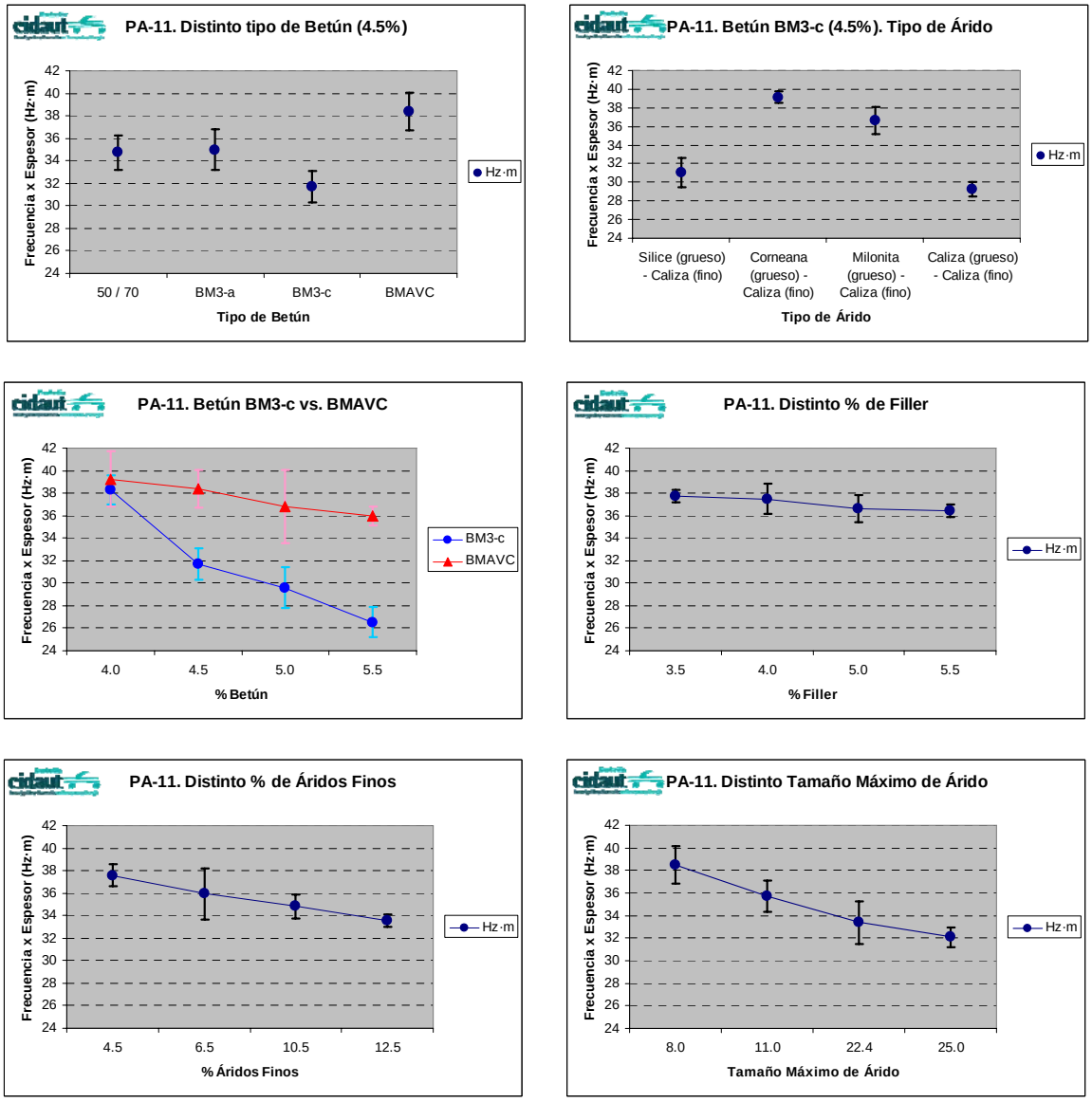


Figura 9. Gráficas donde se representa el producto de la frecuencia del nivel máximo del coeficiente de absorción acústica por el espesor de la probeta con respecto a cada uno de los parámetros de fabricación de las mezclas analizadas.

Del estudio de las gráficas anteriores se puede concluir, que en general las tendencias son similares a las obtenidas con la absorción acústica máxima y por tanto las causas pueden ser las mismas. En particular se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- *Para un mismo porcentaje de betún (4.5%), con los betunes 50/70 y BM3-a se obtienen frecuencias similares, en cambio con el betún BM3-c se obtienen frecuencias más bajas y con los BMAVC frecuencias más altas.*

- *Influye mucho el tipo de árido empleado para realizar las muestras, la mayor frecuencia se obtiene con el árido de tipo Corneana (grueso) – Caliza (fino) y el más bajo con el árido de tipo Caliza (grueso) – Caliza (fino) y Sílice (grueso) – Caliza (fino). Mayor frecuencia con los áridos más duros.*

- *Al aumentar el porcentaje de betún se reduce la frecuencia a la cual se produce la absorción acústica máxima. Este efecto es más acusado en betunes tipo BM3-c.*

- *La variación del porcentaje de filler influye poco en la frecuencia debido a que en cualquier caso se mantiene constante el porcentaje de áridos de tamaño inferior a 2 mm.*

- *Al aumentar el porcentaje de áridos finos o el tamaño de árido máximo se observa en las gráficas que se reduce la frecuencia a la cual se produce la absorción acústica máxima.*

Para un espesor de asfalto determinado, con las conclusiones anteriores se podría diseñar la absorción acústica de un asfalto para que tuviera la máxima absorción acústica a una determinada frecuencia mediante simulación acústica a partir de las propiedades intrínsecas.

El coeficiente de absorción acústica (tanto la frecuencia de máxima absorción, como la amplitud y la anchura del pico), son función del espesor de los asfaltos, además de los parámetros de fabricación que se han mostrado anteriormente.

A continuación se muestran algunas gráficas de absorción acústica a incidencia normal, obtenidas mediante simulación acústica con el software SIMAM desarrollado en CIDAUT, función del espesor y de la frecuencia. En la primera gráfica se representa en un gráfico en dos dimensiones (2D), el coeficiente de absorción acústica para algunos valores discretos de espesores dentro del rango de 15 a 70 mm. Las siguientes figuras son gráficos en tres dimensiones (3D) en los que se presentan los valores del coeficiente de absorción acústica para el rango completo de espesores.

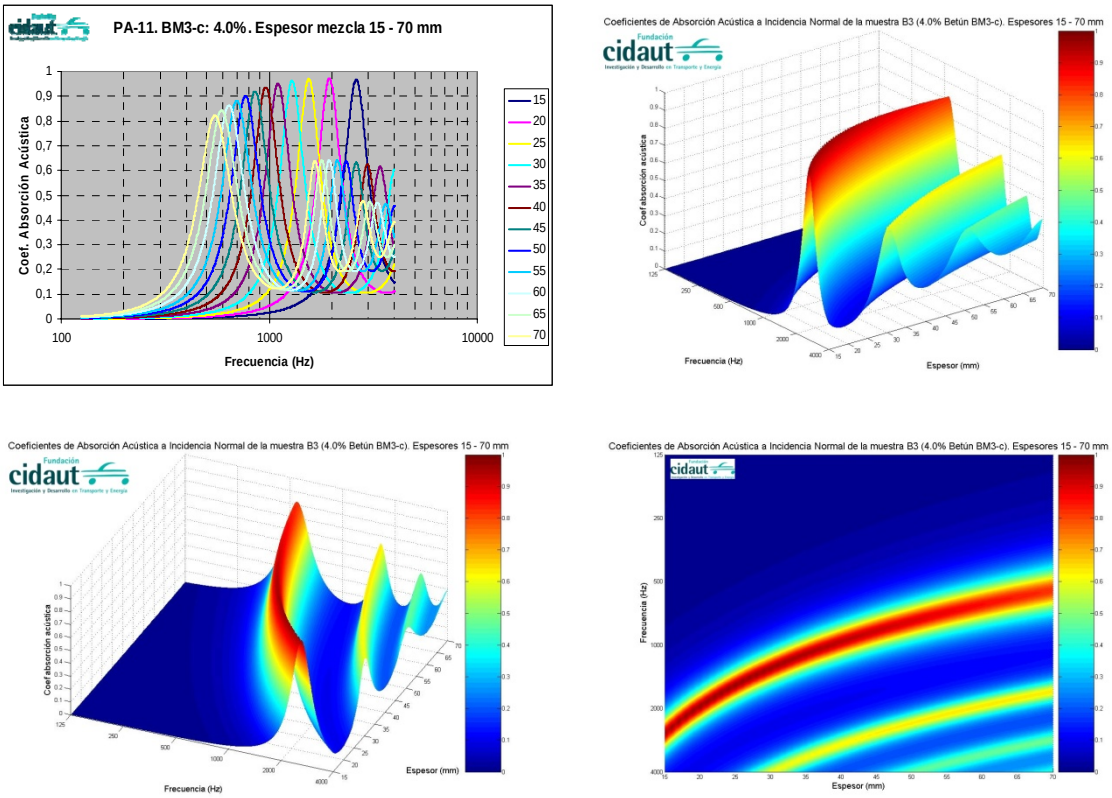


Figura 10. Gráficas de absorción acústica a incidencia normal como función del espesor y de la frecuencia

Una conclusión, muy importante, que se deduce de estas graficas y de todo el estudio realizado en el Proyecto Fénix, es que cuanto menor es el espesor de la capa de mezcla porosa, mayor es la absorción acústica máxima y mayor es la frecuencia a la que tiene lugar.

4.1.2 Ruido de rodadura en un tramo de Herrera de Pisuerga

En el proyecto FENIX la Fundación CIDAUT, ha analizado la Influencia del polvo de neumático en la reducción acústica del nivel sonoro, mediante las caracterizaciones de ruido de rodadura, tanto en CPX como en CPB realizadas en los tramos de Herrera de Pisuerga asfaltados por COLLOSA, donde se comparan un tramo de referencia S12 con una mezcla porosa de doble capa PA 12.

Como se puede comprobar en las siguientes imágenes se consiguió una reducción de ruido de 4 dBA a 80Km/h:

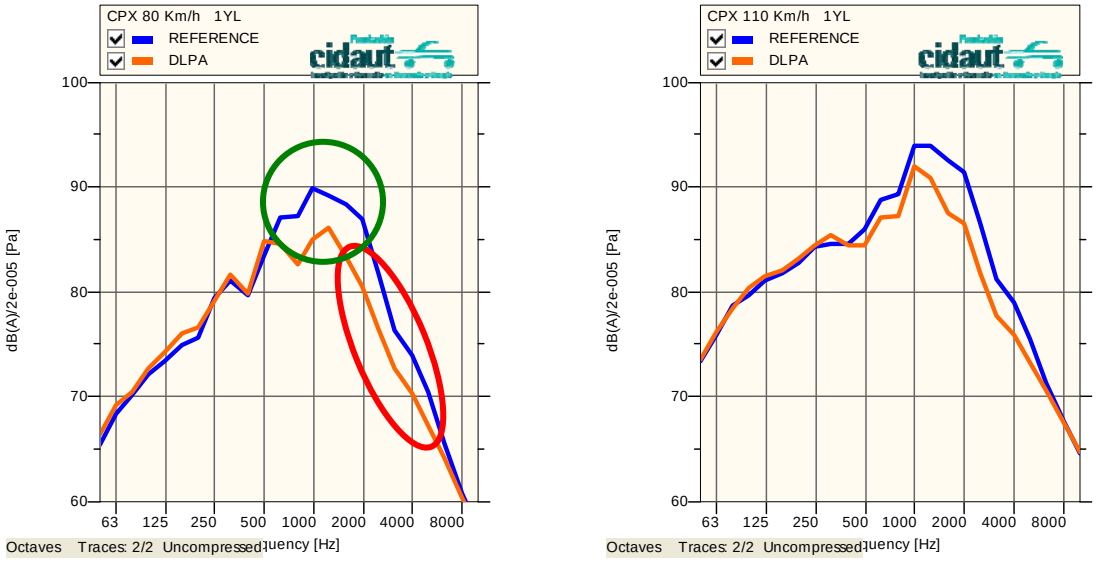


Figura 11. Espectros de emisión sonora (CPX) en proximidad característicos de los tramos S12 (referencia) y mezcla porosa de doble capa PA12.

La reducción acústica se ha obtenido gracias a los siguientes tres mecanismos:

- Presencia de un alto porcentaje de huecos que reducen del Pumping Noise.
- Mejora de la impedancia mecánica, debido al polvo de caucho, reduciendo el nivel de ruido en torno a 1000 Hz.
- Alta absorción acústica a muy altas frecuencias que reduce el nivel de ruido a partir de 2000 Hz debido a que principalmente a la mejora de comportamiento en el efecto Horn.

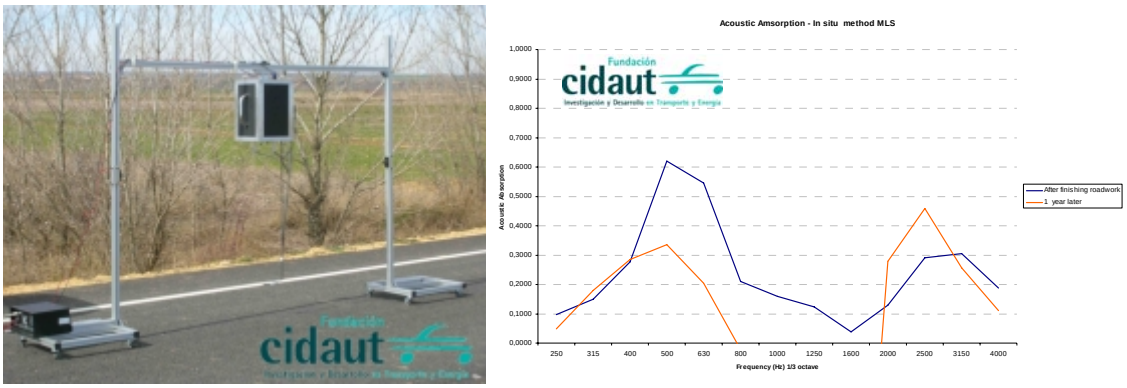


Figura 12. Ensayo de superficie extendida para la medida in-situ de de absorción acústica según norma ISO 13472-1 y curvas de absorción acústica

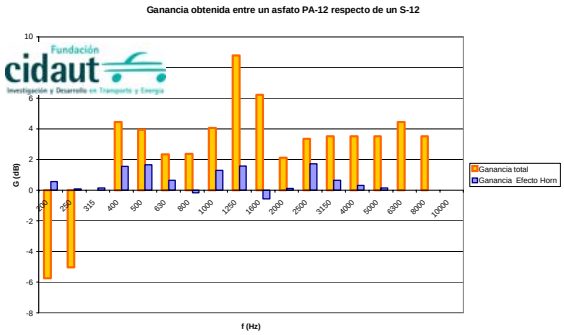


Figura 13. Ganancia total y la debida al efecto Horn de una mezcla PA12 con polvo de neumático respecto a una S12

4.2 MEZCLAS DISCONTINUAS EN CAPAS DELGADAS Y ULTRADELGADAS.

4.2.1 Introducción

El empleo de mezclas de granulometría discontinua permite obtener, en cuanto a su comportamiento sonoro, una superficie de rodadura muy lisa y de macrotextura negativa, consiguiendo una textura óptima y haciendo que algunos de los mecanismos de generación de ruido de rodadura se vean amortiguados. Apenas existen excitaciones que produzcan vibraciones o deformaciones de los neumáticos y los fenómenos de compresión y expansión de bolsas de aire se ven disminuidos por la elevada macrotextura del pavimento. Los mejores resultados parece que se consiguen cuando se reduce el tamaño máximo del árido.

Dentro del marco de la Tarea 9: Seguridad y confort en las carreteras del proyecto Fénix se han investigado distintos diseños de microaglomerados en caliente de granulometría discontinua para poderse compactar en capas delgadas, con tamaño máximo de árido inferior a los que actualmente están prescritos en el Artículo 543 del Pliego de Prescripciones Técnicas PG-3. Los microaglomerados utilizados hasta ahora en España presentan un porcentaje de huecos en mezcla que, en general, no superan el 15%. Además de la aplicación en capas de muy pequeño espesor (inferior a 2 cm), se planeó obtener unas mezclas con alto contenido de huecos (próximo al 25%), lo que posibilitaría su utilización en pavimentos urbanos, con un nivel de ruido de rodadura sensiblemente reducido, mejorando el confort y la seguridad de todos los usuarios.

4.2.2 Absorción acústica

La primera fase del proyecto se ha centrado en la caracterización acústica en laboratorio de distintos diseños de mezclas tipos delgadas y ultradelgadas, realizados previamente en el Laboratorio de Asfaltos y Construcciones ELSAN S.A. Para ello, el Laboratorio de Acústica Aplicada a la Ingeniería Civil (LA2IC) de la Universidad de Castilla-La Mancha ha llevado a cabo un estudio de absorción acústica de los diferentes diseños con el tubo de impedancia. Se han evaluado diferentes probetas fabricadas y compactadas a partir de mezclas asfálticas

discontinuas tipo BBTM 11A (F-10), BBTM 11B (M-10) y ultradelgadas con diferente contenido de huecos diseñadas por ELSAN y en las que se han modificado los diferentes parámetros que interviene en las mismas (tipo y tamaño máximo del árido, contenido y tipo de betún asfáltico, % de huecos, etc.) con el objetivo de analizar su influencia sobre la capacidad de absorción acústica.

Analizando los resultados, se observa que un factor importante a tener en cuenta es el bajo contenido de huecos que presenta las mezclas discontinuas tipo BBTM 11A (generalmente inferior al 10%). La gran mayoría de las medidas analizadas en los diferentes estudios presentaron, de forma general, espectros prácticamente planos o con máximos de absorción de intensidades inferiores a 0.3 (ver por ejemplo la figura 14). Este comportamiento refleja la deficiente capacidad de absorción sonora de las probetas BBTM 11A, por lo que la influencia de los diferentes parámetros de fabricación estudiados no parece ser determinante en el comportamiento final.

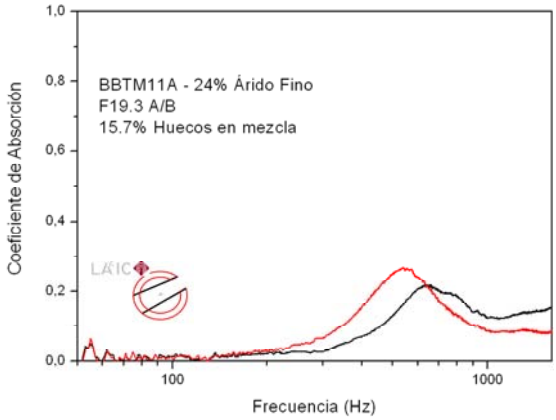


Figura 14. Espectros absorción sonora de mezclas BBTM 11A.

Por otro lado, los espectros asociados a probetas tipo BBTM 11B (contenido de huecos alrededor del 15%) presentaron máximos de absorción sonora centrados en frecuencias superiores a 800 Hz y de intensidades por encima de 0.6 (fig. 15), apropiados para minimizar el impacto del ruido de rodadura generado por el tráfico ligero circulando a velocidades superiores a 50 km/h. La influencia del tamaño máximo de árido empleado también parece verse reflejada en el comportamiento acústico. Aquellas probetas con menores tamaños máximos (16 mm, 11 mm y 8 mm) y mayores porcentajes de huecos en mezcla presentaron mayor intensidad de absorción sonora. Además, espectros asociados a probetas con menor cantidad de árido fino (11-13%) presentaron máximos de absorción sonora de intensidades entre 0.5-0.7 centrados en frecuencias superiores a 800 Hz.

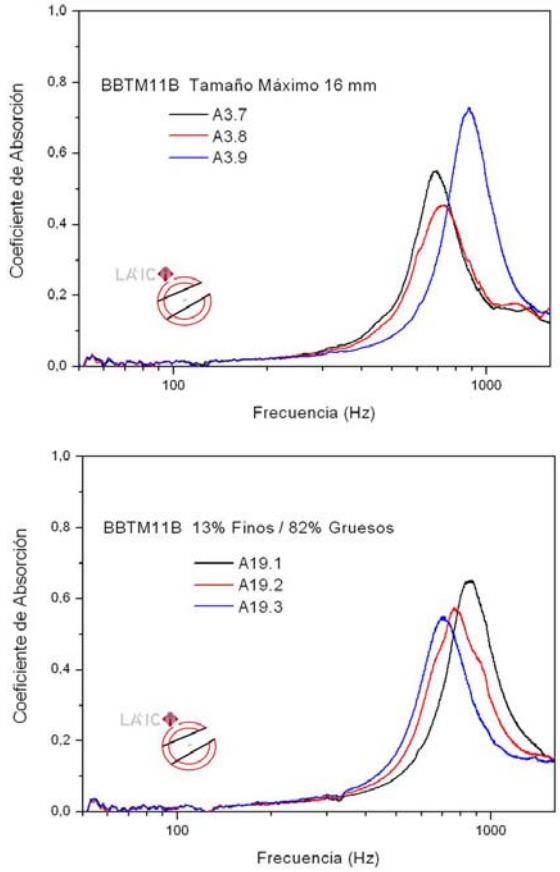


Figura 15. Espectros absorción sonora de mezclas BBTM 11B.

Como se puede observar en la figura 16, la alta porosidad que presentan las mezclas ultradelgadas analizadas (>25% huecos) permite obtener máximos de absorción sonora de intensidades superiores a 0.8 centrados en intervalos de frecuencias por encima de 1 kHz.

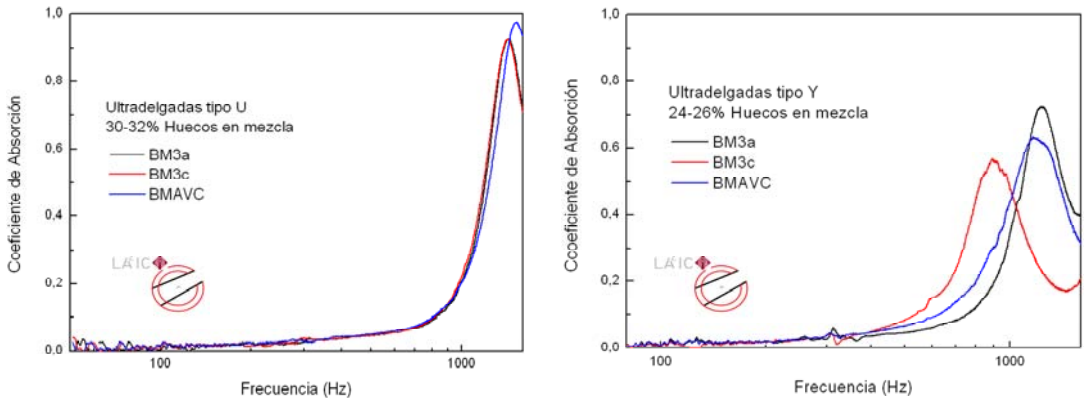


Figura 16. Espectros absorción sonora de mezclas ultradelgadas.

Atendiendo a los resultados del estudio en mezclas tipo discontinuas se corrobora que el contenido de huecos en mezcla y su interconexión son factores determinantes en la capacidad de absorción sonora. Los parámetros de diseño como granulometría, porcentaje de betún o tamaño máximo de árido definen la estructura superficial e interna de las probetas compactadas. Se ha comprobado que mezclas con contenidos de huecos por debajo del 18% muestran una capacidad de absorción sonora baja. Por otro lado, porcentajes de huecos superiores al 24% tendrán una influencia directa en la emisión sonora global, ya que parte de la energía acústica generada en la interacción neumático/pavimento se verá disminuida por mecanismos de absorción.

4.2.3 Ruido de rodadura de proximidad en un tramo experimental

En la segunda fase del proyecto, para realizar la caracterización acústica de estas mezclas tipo discontinua a escala real, se construyó un tramo de ensayo experimental en la carretera A-472, provincia de Sevilla, con la colaboración de GIASA. Se realizaron dos tramos experimentales con microaglomerados discontinuos en capa ultradelgada (espesor medio de 2.2 cm) con diferentes porcentajes de huecos en mezcla (15 y 25%). En ellos se evaluó el ruido de rodadura generado por la interacción entre diferentes neumáticos de referencia y las mezclas experimentales compactadas en capas ultradelgadas con el equipo de auscultación en proximidad Tiresonic Mk4-LA2IC (fig. 17) basado en la metodología CPX (Close Proximity Method).

Figura 17. Remolque Tiresonic MK4-LA2IC en la zona de estudio.

Como se puede observar en la figura 18, los niveles sonoros en proximidad (LCPtr) aumentan en la zona experimental con respecto al pavimento discontinuo convencional tipo BBTM 11A, con el que se han pavimentado los tramos contiguos al tramo experimental y que se han seleccionado como superficie de referencia.

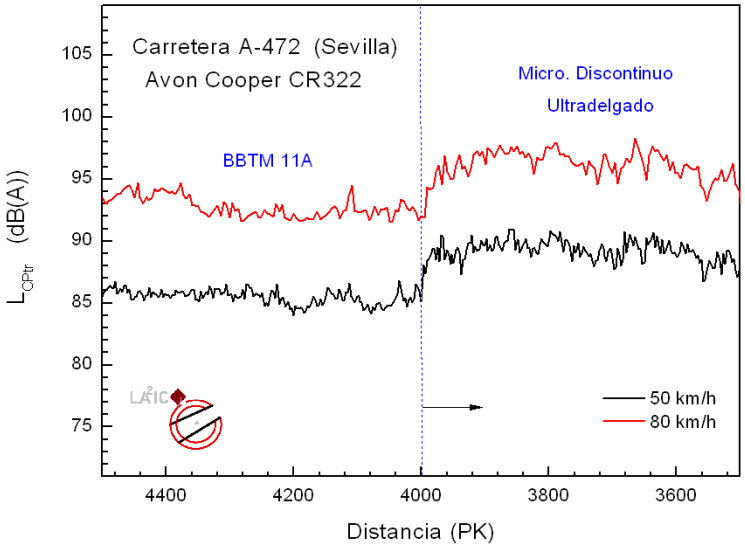


Figura 18. Niveles sonoros en proximidad (LCPtr) en el tramo experimental con microaglomerados ultradelgados.

Analizando los espectros de emisión sonora (CPX) característicos de cada una de las mezclas (fig. 19), se puede observar que para frecuencias por debajo de 1 kHz, asociadas a los mecanismos de generación relacionados con impactos y vibraciones, se obtienen mayores niveles en los tramos experimentales que en la superficie de referencia. Este fenómeno podría estar directamente relacionado con la macrotextura de las diferentes superficies. Diferentes medidas de esta propiedad indicaron que las mezclas ultradelgadas presentaban índices superiores de textura en comparación con la superficie de referencia tipo BBTM 11A. Sin embargo, para frecuencias altas, normalmente relacionadas con mecanismos aerodinámicos, los niveles sonoros obtenidos son inferiores para los tramos experimentales.

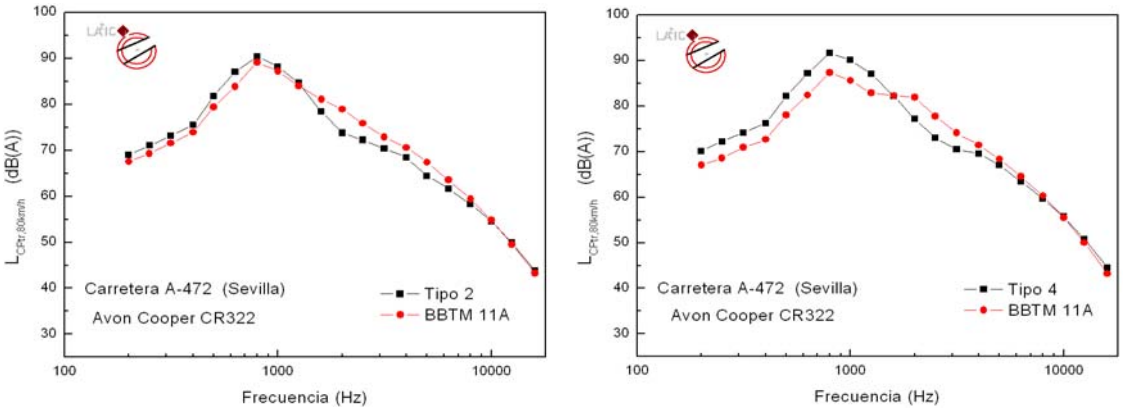


Figura 19. Espectros de emisión sonora (CPX) en proximidad característicos de los tramos experimentales con mezclas discontinuas tipo ultradelgadas.

A partir del estudio realizado y de los resultados obtenidos de la caracterización acústica a escala real parece mostrar que a pesar del elevado contenido de huecos que presentan las mezclas ultradelgadas evaluadas, no se reduce la emisión sonora, excepto a latas frecuencias, si se comparara con un tramo de referencia tipo BBTM 11A. Este hecho, indicaría la importancia que tienen en el comportamiento acústico final otros parámetros superficiales de los pavimentos como la textura o la elasticidad (rigidez) de la capa de rodadura, como se ha comprobado en el apartado de las mezclas porosas, donde mezclas porosas con polvo de caucho reducían en 4dB el nivel de ruido de rodadura.

5. CRITERIOS PARA REDUCIR EL RUIDO DE RODADURA.

Basándose en los resultados obtenidos en los distintos estudios experimentales dentro del Proyecto Fénix y en la recopilación de diferente bibliografía relacionada con el diseño de pavimentos sono-reductores, a continuación se detallan una serie de directrices para reducir el ruido de rodadura generado por la interacción entre el neumático y el pavimento:

- CONTENIDO DE HUECOS EN MEZCLA.

  Medidas en laboratorio de la capacidad de absorción acústica mediante tubo de impedancia y análisis de espectros de emisión sonora (CPX) obtenidos de auscultaciones acústicas de tramos experimentales a escala real indican que un contenido de huecos superior al 18%, respetando los requerimientos de durabilidad, se consigue aumentar la eficiencia acústica sono-reductora de la superficie de rodadura, principalmente disminuyendo los mecanismos aerodinámicos (medias y altas frecuencias). En este punto es muy importante tener en cuenta el fenómeno de colmatación de los huecos superficiales, ya que éste implicaría una disminución de los beneficios acústicos obtenidos.

- OPTIMIZACIÓN DE LA TEXTURA SUPERFICIAL DE LA CAPA DE RODADURA.

La textura es un parámetro superficial determinante en los mecanismos de generación relacionados con el impacto del neumático sobre el pavimento y las vibraciones producidas. El incremento de la microtextura mediante el empleo de áridos de morfología áspera disminuye la generación sonora a altas frecuencias con relación a los de textura lisa o pulida. No obstante, este efecto no presenta una influencia elevada en el comportamiento sonoro final. Sin embargo, la macrotextura influye en gran medida en la generación sonora. En superficies de rodadura se requiere una macrotextura rugosa; ahora bien hay que conseguir que la emisión de ruido de rodadura no sea demasiado elevada. Para ello, una reducción del tamaño máximo de árido utilizado disminuiría los niveles sonoros generados. Además, es necesario resaltar la gran la importancia de minimizar la megatextura relacionada con diversos tipos de fallos o degradaciones del pavimento, pues contribuye a una rodadura más incómoda con vibraciones que aumentan el nivel de ruido a bajas frecuencias.

- INCORPORACIÓN DE POLVO DE CAUCHO PROCEDENTE DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO.

Normalmente, los pavimentos que incorporan polvo de caucho en su mezcla lo hacen, entre otros objetivos, para lograr una superficie de rodadura más elástica que amortigüe el impacto del neumático y, por lo tanto, las vibraciones que generan el ruido a medias y bajas frecuencias. Para conseguir este propósito algunos autores han observado que en aquellas mezclas que incorporan polvo de caucho por vía húmeda, el porcentaje de éste es determinante en el comportamiento sonora final.

Por otro lado, las mezclas en la que la incorporación se realiza por vía seca, con el caucho sustituyendo a parte del árido mineral en la granulometría, presentan un destacado comportamiento sono-reductor inicial (ver por ejemplo los resultados sobre Lechadas Bituminosas llevados a cabo en el marco del Proyecto Fénix). Sin embargo, es preciso seguir desarrollando y estudiando nuevos diseños para incrementar su durabilidad estructural y funcional.

- COLOR DE LA SUPERFICIE DE RODADURA.

Para obtener menor emisión sonora es recomendable utilizar mezclas bituminosas oscuras. Este aspecto está relacionado con la temperatura que las superficies pueden llegar a alcanzar por la radiación solar a lo largo del día. Se ha estudiado que la temperatura es un factor determinante en el comportamiento acústico, reduciéndose los niveles sonoros emitidos conforme aumenta la temperatura del pavimento. Se ha comprobado experimentalmente que este incremento puede influir en una relación de 0.5 dB(A) por cada aumento de 10 ºC (ver Informes LA2IC para Proyecto Fénix)

- PUESTA EN OBRA DE LA MEZCLA, CONDICIONES DE TRÁFICO Y MANTENIMIENTO.

Quizás el factor de mayor importancia en el comportamiento acústico final de las mezclas asfálticas en servicio sea el proceso de construcción, tanto la fabricación como la extensión y la compactación. Para la obtención de una superficie acústicamente óptima hay que controlar, entre otros, la compactación, la regularidad superficial y evitar la falta de homogeneidad de las mezclas debido a segregaciones granulométricas o térmicas. Por otro lado, la durabilidad acústica de las capas de rodadura está relacionada con las condiciones de tráfico y el clima que soporta. El desprendimiento de áridos (ravelling) y/o su pulimiento, la formación de fisuras o la colmatación de los huecos superficiales en pavimentos porosos son ejemplos que provocan que el ruido de rodadura se incremente con el tiempo en servicio.

6. CONCLUSIONES.

En el proyecto FENIX se ha analizado cómo afecta la variación de diferentes parámetros de fabricación (tipo de betún, naturaleza de árido, porcentaje de betún BM3-c y de betún BMAVC, porcentaje de filler, porcentaje de áridos finos y tamaño máximo de áridos), de las mezclas bituminosas en caliente drenantes y de los microaglomerados de granulometría discontinua para capas delgadas y ultradelgadas, en la curva de absorción acústica mediante el empleo de ensayos experimentales y herramientas de simulación acústica.

En el caso de las mezclas porosas, la conclusión principal ha sido que gracias a la investigación realizada, se podrá construir pavimentos más silenciosos, es decir, más eficientes acústicamente (desde el punto de vista de la absorción acústica), reduciendo el nivel de ruido percibido por el usuario y manteniendo la seguridad de la carretera. Además se han extraído otras conclusiones secundarias de las relaciones que existen entre los diversos parámetros de fabricación de una mezcla bituminosa en caliente de tipo porosa y el coeficiente de absorción acústica, se ha comprobado que se aumenta la absorción acústica máxima de las mezclas posas tipo PA 11 de las maneras siguientes:

- Utilizando betunes 50/70 y BM3-a.
- Utilizando áridos de tipo Corneana (árido grueso muy duro) – Caliza (árido fino).
- Reducción del porcentaje de betún (teniendo en cuenta que finalmente habrá que buscar una solución de compromiso ya que es importante el porcentaje para generar menor ruido por la interacción pavimento-neumático).
- El efecto del porcentaje de betún es mucho más acusado en los betunes tipo BM3-c.
- Modificar el porcentaje de filler apenas influye.

- Reducción del porcentaje de áridos finos.
- Reducción del tamaño de árido máximo.

Estas relaciones son de especial interés porque muestran las tendencias cuando se realizan cambios en los parámetros de fabricación de las muestras dentro de un rango, pero como se ha comprobado en el Proyecto Fénix, para poder diseñar mezclas bituminosas porosas optimizadas acústicamente (mejora de la absorción acústica), en primer lugar hay que determinar, mediante el CARAM, las propiedades intrínsecas (resistividad, tortuosidad y porosidad) de diferentes mezclas asfálticas, y en segundo lugar realizar simulaciones acústicas, mediante el SIMAM, que permitan definir los parámetros de fabricación de la mezcla asfáltica drenante óptima.

Las mezclas porosas de doble capa realizadas con polvo de caucho reducen el ruido de rodadura debido al porcentaje de huecos, a su impedancia mecánica.

En los micros para capas delgadas y ultradelgadas se ha demostrado que cuanto mayor es el porcentaje de huecos en mezcla y cuanto menor es el tamaño máximo del árido, se consiguen unos pavimentos con mayores valores de absorción acústica.

7. BIBLIOGRAFÍA.

- Sociedad Española de Acústica (Fundación CIDAUT). Acústica ambiental: análisis, legislación y soluciones. Aplicaciones acústicas de pavimentos. 2009.
- Sandberg, U. & Ejsmont J. Tire/Road Noise Reference Book. Informex. SE-59040 Kisa, Sweden (www.informex.info).
- UNE-EN 13108-7. Mezclas bituminosas drenantes. Especificaciones de materiales.
- García, C.; del Cerro, J.; González, J.A.; Morcillo, M.A. Propiedades acústicas intrínsecas de los asfaltos. Comparación de los aglomerados fabricados con y sin polvo de neumático. ASEFMA 2008 - III Jornada Nacional - “ASEFMA más de 100 razones”, Madrid, 24 de Enero de 2008.
- Auscultación acústica de lechada con polvo de caucho en la CM-4106. Informe 2008b. Proyecto CENIT CEN-2007014. FENIX-UCLM (LA2IC). Investigación en nuevos conceptos de carreteras más seguras y sostenibles. Actividad nº 9.
- Auscultación acústica de diferentes capas de rodadura en la CM-4106. Informe 2008c. Proyecto CENIT CEN-2007014. FENIX-UCLM (LA2IC). Investigación en nuevos conceptos de carreteras más seguras y sostenibles. Actividad nº 9.

- Estudio de la absorción acústica en MBC discontinuas BBTM 11A (F-10) y BBTM 11B (M-10). Informe 2009b. Proyecto CENIT CEN-2007014. FENIX-UCLM (LA2IC). Investigación en nuevos conceptos de carreteras más seguras y sostenibles. Actividad nº 9.

- Análisis y conclusiones de la auscultación acústica de la CM-4106. Informe 2008d. Proyecto CENIT CEN-2007014. FENIX-UCLM (LA2IC). Investigación en nuevos conceptos de carreteras más seguras y sostenibles. Actividad nº 9.

- Auscultación acústica de la CM-4106 a los 6 meses de la primera medida. Informe 2009a. Proyecto CENIT CEN-2007014. FENIX-UCLM (LA2IC). Investigación en nuevos conceptos de carreteras más seguras y sostenibles. Actividad nº 9.

- Estudio de la absorción acústica en MBC discontinuas BBTM 11B (M-10). Influencia del tipo y contenido del tamaño máximo de árido y contenido de filler y finos. Informe 2009d. Proyecto CENIT CEN-2007014. FENIX-UCLM (LA2IC). Investigación en nuevos conceptos de carreteras más seguras y sostenibles. Actividad nº 9.

- Estudio de la absorción acústica en MBC discontinuas BBTM 11A (F-10). Influencia del tipo y contenido del tamaño máximo de árido y contenido de filler y finos. Informe 2009e. Proyecto CENIT CEN-2007014. FENIX-UCLM (LA2IC). Investigación en nuevos conceptos de carreteras más seguras y sostenibles. Actividad nº 9.

- Estudio de la absorción acústica en MBC tipo discontinuas. Ultradelgadas 1. Influencia del tipo y porcentaje de betún. Informe 2009j. Proyecto CENIT CEN-2007014. FENIX-UCLM (LA2IC). Investigación en nuevos conceptos de carreteras más seguras y sostenibles. Actividad nº 9.

- Estudio de la absorción acústica en MBC tipo discontinuas. Ultradelgadas 2. Influencia del tipo y porcentaje de betún. Informe 2009k. Proyecto CENIT CEN-2007014. FENIX-UCLM (LA2IC). Investigación en nuevos conceptos de carreteras más seguras y sostenibles. Actividad nº 9.

- Estudio de la absorción acústica en MBC discontinuas BBTM 11A (F-10) y BBTM 11B (M-10). Influencia del porcentaje de betún. Informe 2010a. Proyecto CENIT CEN-2007014. FENIX-UCLM (LA2IC). Investigación en nuevos conceptos de carreteras más seguras y sostenibles. Actividad nº 9.

- Estudio de caracterización acústica de tramos experimentales de la carretera regional A-472 (Sevilla). Informe 2010b. Proyecto CENIT CEN-2007014. FENIX-UCLM (LA2IC). Investigación en nuevos conceptos de carreteras más seguras y sostenibles. Actividad nº 9.

- S.E. Paje, M. Bueno, F. Terán., U. Viñuela, Monitoring road surfaces by close proximity noise of the tire/road interaction. Journal of the Acoustical Society of America, 122 (2007), 2636-2641.
- 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, 123 (3), March 2008.
- 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 (L). Journal of the Acoustical Society of America, 125(1), January 2009.
- 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, 71 (2010), 578-582.
- R. Miró, F. Pérez-Jiménez, A.H. Martínez, O. Reyes-Ortiz, S.E. Paje, M. Bueno Effect of using crumb rubber bituminous mixes on functional characteristics of road pavements. Journal of the Transportation Research Board, 2126 (2009),83-90.
- M. Bueno, J. Luong, U. Viñuela, F. Terán, S.E. Paje. Road surface temperatura influence on tire/pavement close proximity noise. Internoise 2010. Lisboa (Portugal).
- M. Bueno. Caracterización acústica de mezclas asfálticas para atenuar la contaminación sonora. Tesis Doctoral. Universidad de Castilla-La Mancha. Ciudad Real, Junio 2010.
- Directiva 2002/49/CE de 25 de Junio de 2002 sobre evaluación y gestión del ruido ambiental.
- Ley 37/2003 del Ruido de 17 de noviembre de 2003 (BOE num. 276).
- Monografía 3 Asefma. Reducción del ruido ambiental en origen. Contribución del sector de mezclas asfálticas. Enero 2009.
- SILVIA. Guidance manual for the implementation of low-noise road surfaces. FEHRL Report 2006/02, Bruselas.
- SILENCE WP.F4 – Noise Classification methods for urban roads surfaces (2005).
- Borrador Norma ISO/DIS 11819-2 Acoustics. Methods for measuring the influence of road surface on traffic noise – Part 2: Close Proximity method.
- R. Miró Recasens. Nuevas mezclas para capas de rodadura y su influencia en el confort (ruido) y la seguridad. Cátedra Mariano López Navarro. Diciembre 2006. Zaragoza.

- Ruiz. Panorámica española de las mezclas bituminosas. Desarrollos recientes. Consideraciones de futuro. Jornada técnica ASEFMA. Panorámica actual de las mezclas bituminosas. ASEFMA, un nuevo enfoque. Junio 2005 Madrid.
- García, J. del Cerro, M.J. Hernández y A. Hidalgo. Investigación de mezclas bituminosas en caliente fabricadas con polvo de neumáticos usados para la reducción del ruido de rodadura. Jornada técnica ASEFMA.
- P.R. Donavan. Comparative Measurements of Tire/Pavement Noise in Europe and the United States. The NITE-study, Illingworth & Rodkin, Inc., prepared for The California Department of Transportation (2005).
- U. Sandberg, B. Kalman. The poro-elastic road surface – Results of an experiment in Stockholm. Forum Acusticum 2005. Budapest (Hungría).
- T. Fujiwara, S. Meiarashi, Y. Namikawa, M. Hasebe. Noise reduction effect of porous elastic road surface and drainage asphalt pavement. TRB Annual Meeting 2005, Washington DC (USA).
- S.M. Phillips, S. Kollamthodi, P.A. Morgan. Classification of low noise road surfacings. Internoise 2001. La Haya (Países Bajos).
- T. Bennert, D. Hanson, A. Maher, N. Vitillo. Influence of pavement surface type on tire/pavement generated noise. Journal of testing and evaluation, 38 (2005), 94-100.
- P.R. Donavan, D.M. Lodico. Measuring tire-pavement noise at the source. NCHRP Report 630. Washington 2009.
- U. Sandberg. Road Traffic Noise – The Influence of the Road Surface and its Characterization. Applied Acoustics, 21 (1987), 97-118.
- F. Anfosso-Lédée, Y. Pichaud. Temperature effect on tyre-road noise. Applied Acoustics, 68 (2007), 1-16.
- Von Meier. Thin porous surface layers – design principles and results obtained. Eurosymposium. The mitigation of traffic noise in urban areas 1992. Nantes (Francia).
- H. Bendtsen, B. Andersen, S. Thomsen. Optimized thin layers for highways. Internoise 2007. Agosto 2007. Estambul (Turquía).
- Witoszek, M. Alonso, F. Hernández y C. Benito. Diseño desarrollo y seguimiento de un aglomerado asfáltico con polvo de caucho, procedente del reciclado de los neumáticos usados, e incorporado por vía seca. Jornada técnica ASEFMA.
- J.J. Potti y J.L. Peña. Desarrollo de una gama de productos a base de betún modificado con polvo de neumáticos. Casos prácticos. Jornada técnica ASEFMA.

- Rust, J. Affenzeller. CALM – An EU Net-work for strategic planning of future noise research. Euronoise, Naples (2003).
- García et al. Acoustic Pavement: Experiences at Valencia City. SMILE Workshop. Guidelines for Road Traffic Noise Abatement. Berlin (2003).
- García, J. del Cerro, M.A. Morcillo, J.A. González, M.J. Hernández. Estudio Acústico de asfaltos. Diseño de un asfalto poroso con polvo de neumático a partir de sus cualidades acústicas. VIII Congreso Nacional de Firmes. Valladolid (2008).
- L. de los Santos, J. Gallego, J.M. Baena, A. Costa. Pavimentos con BMAVC-1: Reducción del ruido en la avenida de la albufera (Madrid). VIII Congreso Nacional de Firmes. Valladolid (2008).
- J. del Cerro. Mezclas bituminosas de baja sonoridad. Experiencias realizadas en la red general de carreteras del estado. Provincia de Málaga. VIII Congreso Nacional de Firmes. Valladolid (2008).
- L. Bretón, J.A. Soto. Contribución a la disminución del ruido producido por el tráfico según el tipo de rodadura. III Jornada Técnica ASEFMA, Madrid (2008).
- F.E. Pérez-Jiménez. Influencia del pavimento y de las condiciones de circulación. Revista de Acústica, vol. XXII (1991).
- J. Muñoz. Medición de la influencia de la superficie de las carreteras en el ruido de rodadura por el método de proximidad (CPX). Publicaciones Técnicas del CEDEX (2005).
- M.C. Berengier, M.R, Stinson, G.A. Daigle, J.F. Hamet. Porous road pavements: Acoustical characterization and propagation effects. J. Acoust. Soc. Am. 101 (1), 155-162 (1997).
- T. Beckenbauber. Pilot study. Noise reduction potential. Road surfaces. Report nº M69453/1 (2007).
- H. Bendsten, H. Larsen. Two layer porous pavements and noise reduction in Denmark (2003).

AGRADECIMIENTOS

La realización del Proyecto Fénix www.proyectofenix.es ha sido posible gracias a la contribución financiera del Centro para el Desarrollo Tecnológico e Industrial (CDTI) dentro del marco del programa Ingenio 2010 y, más concretamente, a través del Programa CENIT. Las empresas y centros de investigación que participan en el Proyecto desean mostrar su gratitud por dicha contribución.

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

Cofinanciado por: CDTI Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial

Participantes del Proyecto Fénix. Reunión final del Proyecto – noviembre 2010