

Mezclas bituminosas recicladas semicalientes con espuma de betún

José Ramón López Marco, jrlopez@pavasal.com

Jesús Felipe Sanjuán, jfelipo@pavasal.com

José Berbis Latorre, jberbis@pavasal.com

Pavasal

José Ramón Albert García, jralbert@pavasal.com

Alberto Moral Quiza, albmor@cartif.es

Pavasal

Cartif

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

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

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

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

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

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

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

1. Introducción

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

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

Mezclas bituminosas recicladas semicalientes con espuma de betún

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

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

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

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

2. Mezclas Semicalientes espumadas

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

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

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

2.1 Proceso de espumación

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

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

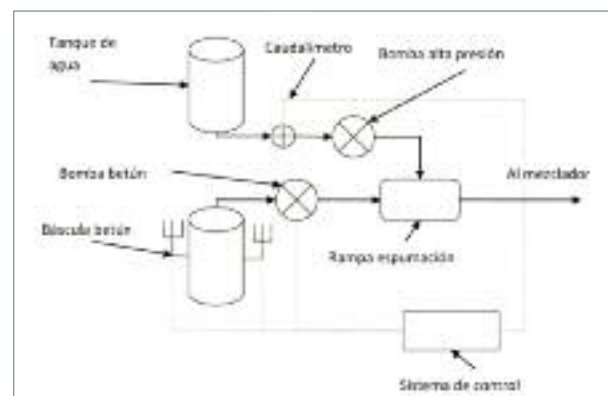


Figura 1: Esquema de funcionamiento del sistema de espumado BITFOAM.



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

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

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



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

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

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

Características mecánicas de las mezclas semicalientes con espuma de betún

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

Mezclas bituminosas recicladas semicalientes con espuma de betún

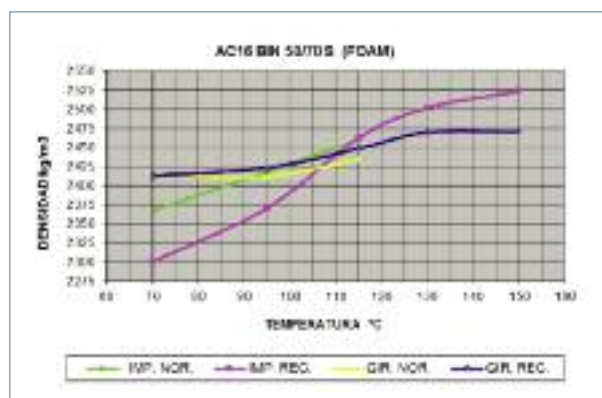


Figura 4: Representación gráfica de la evolución de las densidades de la mezcla AC16 BIN 50/70 semicaliente espumada en función de la temperatura de compactación.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2.3 Análisis medioambiental de las mezclas semicalientes con espuma de betún

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

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

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

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

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

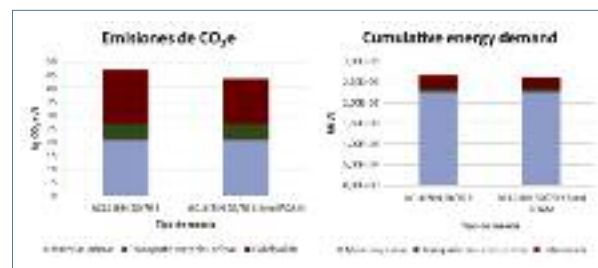


Figura 5: Comparativa mediante el indicadores CO₂e y CED de una mezcla AC16 Bin 50/70 S de fabricación estándar (160°C) y su homóloga fabricada con espuma de betún a 130°C.

Mezclas bituminosas recicladas semicalientes con espuma de betún

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

3. Mezclas Bituminosas Recicladas

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

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

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

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

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

3.1 Análisis ambiental de las mezclas recicladas

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

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

4. Mezclas Recicladas Semicalientes con espuma de betún

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

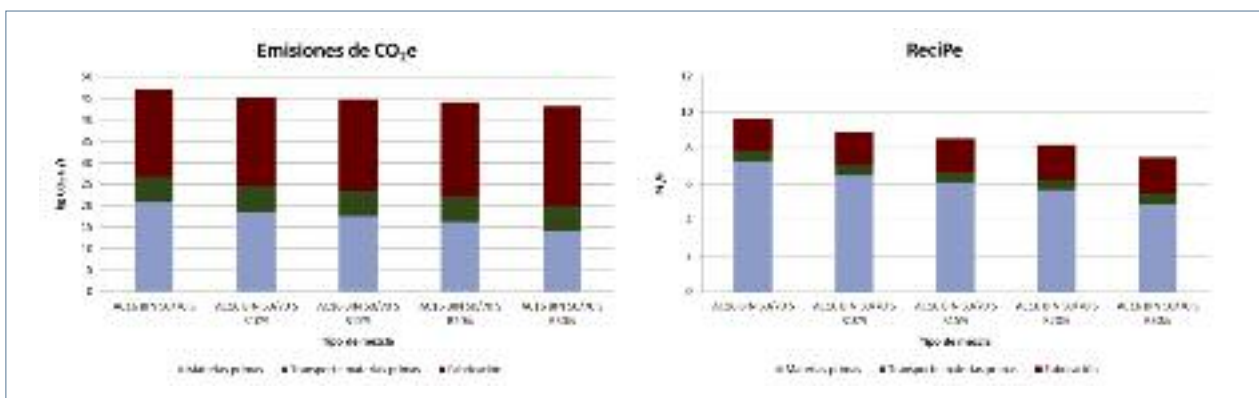


Figura 6: Análisis de ACV representado con el indicador CO₂e y el de conjunto RECIPE (unidad funcional :Tonelada Fabricada), para distintos porcentajes de RAP en la mezcla.



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Mezclas bituminosas recicladas semicalientes con espuma de betún

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

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

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

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

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

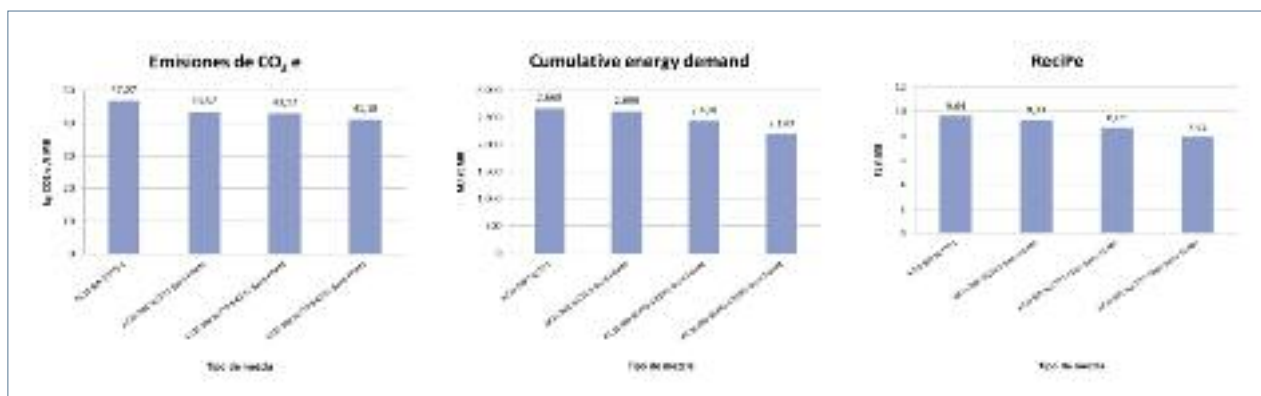


Figura 8: Análisis de ACV representado con el indicador CO₂ e, CED y el de conjunto RECIPE (unidad funcional :Tonelada Fabricada), para distintos porcentajes de RAP con espuma de betún en una mezcla del tipo AC16 BIN 50/70 S.

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

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

5. Conclusiones

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

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

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

6. Referencias

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