

Mezclas bituminosas semicalientes en la autovía A-23 (Zaragoza)



Warm mix asphalt in the A-23 highway (Zaragoza)

Rafael Benavente Valero

Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana

Anna París Madrona

Parma Ingeniería

En una obra de rehabilitación del firme de la autovía A-23, entre los PPKK 250,700 al 277,600 (Zaragoza), se han puesto en obra cerca de 30.000 t de mezclas bituminosas semicalientes, tipos AC 22 bin S 35/50 y AC 16 surf S, fabricadas a una temperatura media de 131 °C, es decir unos 30 °C por debajo de la temperatura típica de una producción convencional en caliente, gracias al uso de un espumador de betún en la central de fabricación. Según los resultados de los ensayos de control de producción y de control de puesta en obra, las mezclas semicalientes han satisfecho los requisitos volumétricos y mecánicos exigidos a las mezclas bituminosas en caliente convencionales equivalentes. En el presente artículo, además del procedimiento de reducción de temperatura utilizado y de los resultados de los ensayos, se revisan las ventajas económicas, técnicas y ambientales de la producción de mezclas bituminosas a bajas temperaturas y, más concretamente, han tratado de cuantificarse las obtenidas en este caso, concluyéndose que el análisis de ciclo de vida es la herramienta idónea para valorar adecuadamente el conjunto de mejoras encontradas. Finalmente, se efectúan algunas recomendaciones relacionadas con la densidad de referencia y la sensibilidad al agua de las mezclas bituminosas semicalientes.

During pavement rehabilitation works carried out on the A-23 highway, between PPKK 250,700 and 277,600 (Zaragoza), about 30,000 t of warm mix asphalt were laid down, AC 22 bin S 35/50 and AC 16 surf S type, produced at an average temperature of 131 °C, that is, about 30 °C below the typical temperature of conventional hot production, through the use of a foaming system retrofitted to the asphalt plant. According to the results of the quality control tests of production and paving operations, the warm mix asphalt has fulfilled the volumetric and mechanical requirements established for the equivalent hot asphalt mixes. This article, besides a description of the temperature reduction procedure used and the results of quality control tests, contains a review of the economic, technical and environmental advantages that may bring producing asphalt mixes at low temperatures and, more specifically, a quantitative analysis of those regarding this case, concluding that the life cycle analysis is the ideal tool to properly assess the set of improvements found. Finally, some recommendations related to the reference density, water sensitivity and resistance to permanent deformation of warm mix asphalt are made.

1. Introducción

En 1997 en Europa y 2002 en los Estados Unidos, se inició la producción de las que hoy se denominan en España *mezclas bituminosas semicalientes* (*enrobés tièdes* en Francia y *warm mix asphalt* o WMA en el mundo anglosajón). Fabricadas a temperaturas de 20 a 45 °C inferiores a las típicas de las mezclas en caliente (comprendidas habitualmente entre 150 y 165 °C) se desarrollaron con objeto de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero de las centrales de fabricación y para mejorar las condiciones de trabajo de los operarios ocupados de la puesta en obra, particularmente de aquellos tipos de mezcla que requieren temperaturas de aplicación más elevadas. En la actualidad, las mezclas semicalientes constituyen una proporción significativa de la producción total de mezclas bituminosas en países como Estados Unidos (46%), Noruega (27%), Francia (13%) o Dinamarca (8%) [1, 2, 3].

Reducir la temperatura de fabricación y puesta en obra de las mezclas bituminosas ofrece, además, otros interesantes beneficios: limita el envejecimiento del betún a corto plazo lo que contribuye a incrementar su durabilidad, da lugar a capas bituminosas más dúctiles y resistentes a la fisuración por fatiga, a la reflexión de grietas y a la fisuración térmica, y facilita su futura reutilización. Además, las mezclas bituminosas semicalientes son trabajables durante más tiempo que las mezclas en caliente y permiten anticipar la apertura al tráfico de las capas recién extendidas puesto que se alcanza antes el umbral de temperatura a partir del cual es posible circular sobre la capa recién compactada [4].

Entre los procedimientos más utilizados para producir mezclas

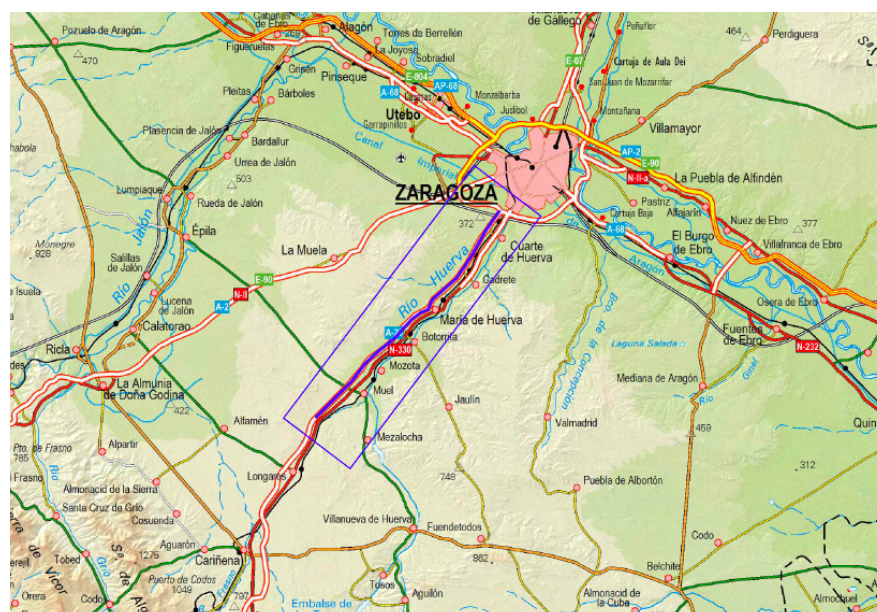


Figura 1. Localización de las obras

semicalientes se hallan los basados en el uso de aditivos surfactantes o reductores de la viscosidad de los betunes, y los que consisten en provocar la espumación del betún mediante la inyección de agua a presión o gracias a la incorporación de zeolitas u otras partículas minerales que liberan agua al ser calentadas. También se han utilizado procedimientos combinados, generalmente, cuando se persiguen las reducciones de temperatura más extremas, es decir, superiores a 40 °C [5].

La producción de mezclas bituminosas semicalientes también presenta algunas dificultades que deben resolverse adecuadamente: los ahorros de combustible no siempre bastan para compensar el coste de las tecnologías de reducción de temperatura utilizadas, suelen requerir adaptaciones en la central de fabricación que pueden afectar a su capacidad de producción, el menor envejecimiento a corto plazo de su betún puede llevar a obtener capas bituminosas con una resistencia a las deformaciones permanentes insuficiente, y la eventual presencia de humedad residual puede perjudicar su resistencia a la acción del

agua y, por tanto, requerir la dosificación de activantes de la adhesividad.

En España, donde las primeras experiencias tuvieron lugar en el año 2000, las mezclas semicalientes han sido incluidas en los artículos 542, 543 y 544 del PG-3, pero su uso sigue siendo excepcional. Según las estadísticas de ASEFMA, en 2020 apenas supusieron un 3% de la producción total de mezclas bituminosas y las realizaciones más significativas aún son consideradas como tramos experimentales 3. Las obras descritas en el presente texto constituyen una de las realizaciones más importantes llevadas a cabo hasta hoy, teniendo en cuenta el tipo de vía (autovía A-23), la categoría de tráfico (T1) y la cantidad de mezcla bituminosa semicaliente puesta en obra (aproximadamente 30.000 t). Con la divulgación de los resultados obtenidos se espera contribuir a anticipar la generalización de la producción de mezclas semicalientes en España y a superar la excepcionalidad que aún suele atribuirse a este tipo de realizaciones.

2. Descripción general de la actuación

La actuación descrita en el presente texto se enmarcó en el proyecto *Rehabilitación superficial y puntualmente estructural del firme de la autovía A-23, entre los PPKK 250,700 al 277,600*, correspondiente al tramo comprendido la localidad de Muel y el enlace de la autovía A-23 con la carretera Z-40 en Zaragoza, abarcando cuatro tipos de actuaciones sobre el firme:

- Actuación 1: fresado y reposición de 10 cm de mezcla AC 32 base 35/50 S en el carril de vehículos lentos,
- Actuación 2: fresado y reposición de 6 cm de mezcla AC 22 bin 35/50 S semicaliente en el carril de vehículos lentos,
- Actuación 3: recrecimiento de 3 cm con mezcla bituminosa tipo BBTM 11B PMB 45/85-60 como nueva capa de rodadura,
- Actuación 4: fresado y reposición de 5 cm con mezcla bituminosa tipo AC 16 surf 35/50 S semicaliente como nueva capa de rodadura en enlaces.

La ejecución del proyecto ha supuesto la rehabilitación de 53,8 km de calzada de dos carriles de circulación. De ellos, 16 km del carril derecho han sido rehabilitados estructuralmente mediante fresado y reposición en una profundidad de 16 cm, afectando a las capas de rodadura, base e intermedia existentes. En 19,2 km del carril derecho se ha efectuado una rehabilitación superficial consistente en el fresado y reposición de 6 cm del pavimento existente, y en toda la longitud, se ha extendido de una nueva capa de rodadura de mezcla discontinua tipo BBTM 11 B. Además, se han rehabilitado 2,95 km de calzada de un carril en enlaces, con la puesta en

obra de una nueva capa de rodadura tipo AC16 S surf 35/50.

En total, se han puesto en obra 30.000 t de mezclas bituminosas semicalientes (28.000 t de AC 22 BIN S 35/50 y 2.000 t de AC 16 SURF S 35/50).

En todas las actuaciones el riego de adherencia ha sido protegido mediante la aplicación de una lechada de cal, diluida y estabilizada, con el fin de asegurar el mantenimiento de la integridad de la película de ligante residual y la ausencia de contaminaciones en la zona de actuación y en el entorno de las obras. Con este tratamiento han sido protegidos efectivamente más de 800.000 m² de superficie.

3. Producción de mezclas bituminosas semicalientes

En la redacción del proyecto de rehabilitación se previó el uso de mezclas tipo AC 22 bin 35/50 S semicaliente en las capas intermedias y tipo AC 16 surf 35/50 S semicaliente en las capas de rodadura de los enlaces, estableciéndose como objetivo las temperaturas de fabricación y puesta

en obra indicadas en la tabla 1. Comparadas con las temperaturas habitualmente empleadas en las mezclas bituminosas en caliente equivalentes (indicadas en la tabla 2), suponen reducir en 20 °C a 30 °C la temperatura de fabricación típica de una producción convencional.

La tecnología de reducción de temperatura para la producción de las mezclas bituminosas semicalientes se ha basado en la espumación directa del betún en la central de fabricación.

3.1. Instalaciones y equipos

La espumación del betún se consigue inyectándole una pequeña cantidad de agua (0,2% a 2% de la masa del betún) mediante un dispositivo denominado espumador instalado entre la báscula del betún y la amasadora de la central de fabricación. La evaporación del agua dispersada en el betún caliente provoca su expansión, aumentando de cinco a diez veces el volumen de ligante disponible para envolver la mezcla de áridos. Así se obtiene una película de ligante más homogénea y una mezcla más trabajable, lo que permi-

Tabla 1. Requisitos de temperaturas para las mezclas semicalientes establecidos en le PPT del proyecto.

Fase de fabricación y puesta en obra	Temperatura
Almacenamiento del betún	160 °C
Mezclado y fabricación	130 °C - 140 °C
Comienzo de extendido y compactación	Mínimo 120 °C
Finalización de la compactación	Mínimo 100 °C

Tabla 2. Requisitos de temperaturas típicos para una mezcla en caliente AC 22 bin S 30/45 convencional

Fase de fabricación y puesta en obra	Temperatura
Almacenamiento del betún	160 °C
Mezclado y fabricación	155 °C - 165 °C
Comienzo de extendido y compactación	Mínimo 130 °C
Finalización de la compactación	Mínimo 110 °C



Figura 2. Central de fabricación de mezclas bituminosas en caliente, marca INTRAME, modelo UM-200, instalada en el T.M. de Botorrita (Zaragoza)

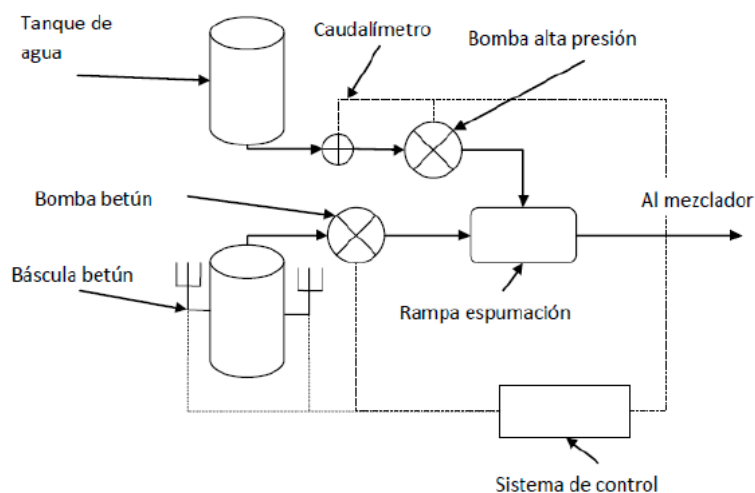


Figura 3. Esquema del equipo de espumación de betón utilizado en las obras

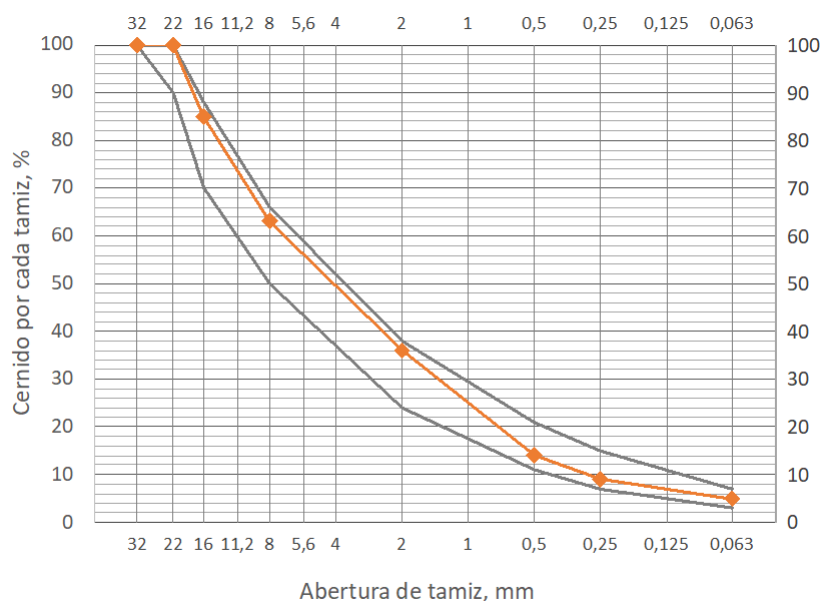


Figura 4. Curva granulométrica de la fórmula de trabajo de la mezcla AC 22 bin 35/50 S semicaliente

te reducir la temperatura de fabricación de 20 °C a 30 °C, sin afectar a la calidad de la mezcla bituminosa ni dificultar su compactación [6, 7 y 8].

3.2. Fórmula de trabajo

La fórmula de trabajo de la mezcla AC 22 bin 35/50 S semicaliente se elaboró empleando los mismos criterios utilizados para el diseño de la mezcla bituminosa convencional equivalente, cuya curva granulométrica puede observarse en la figura 4. En la tabla 3 se presentan las propiedades volumétricas y mecánicas correspondientes, medidas sobre probetas de mezcla semicaliente de central, compactadas a las temperaturas y con las energías de compactación normalizadas. De acuerdo con la experiencia del fabricante, en la espumación de betón se utilizó un 1,50,2% de agua sobre el peso del betón.

3.3. Tramo de prueba y ejecución de las obras

El 30 de septiembre de 2020 se construyó un tramo de prueba para la mezcla AC 22 bin 35/50 S semicaliente en un área de descanso de la N-330. La mezcla se fabricó a 125 °C y se puso en obra en las mismas condiciones y con los mismos equipos previstos para la ejecución de las obras. Se tomaron muestras para analizar las propiedades volumétricas y mecánicas de la mezcla semicaliente, así como el funcionamiento de los equipos de compactación.

Los resultados obtenidos se han recopilado en la tabla 4, donde pueden compararse con los correspondientes a la fórmula de trabajo. La relación filler/betón resultó más elevada de lo previsto, y los huecos en mezcla y en áridos inferiores. En cualquier caso, en las propiedades

de la mezcla que pueden verse más afectadas por inyección de agua en el betún y la reducción de temperatura de fabricación no se apreciaron efectos desfavorables: el ensayo de sensibilidad al agua proporcionó mayor resistencia conservada y también mejoró la resistencia a la deformación permanente medida en probetas de 60 mm de espesor. Se consideró que, en conjunto, los resultados fueron suficientemente próximos a los previstos para dar por aprobado el tramo de prueba e iniciar las obras.

La totalidad de la mezcla bituminosa AC 22 bin 35/50 S fue fabricada a temperaturas comprendidas entre 120 °C y 147 °C, con una temperatura promedio de 131 °C que supone reducción de 29 °C respecto a la temperatura de 160 °C típica de la producción convencional. La capa de rodadura que se extendió a continuación, tipo BBTM 11B PMB 45/80-65 se completó el 6 de septiembre de 2021.

4. Resultados y análisis de los resultados de los ensayos

4.1. Resultados de los ensayos de control de producción

En la tabla 5 se presenta un resumen de los resultados de los ensayos de control de fabricación de la mezcla bituminosa AC 22 bin 35/50 S semicaliente. Corresponden a muestras tomadas diariamente en la central, con las que se elaboraron probetas compactadas en condiciones estándar (compactador de impactos, 75 golpes por cara y una temperatura de 160° C). Los valores medios obtenidos satisficieron los requisitos del PPT del proyecto y las dispersiones fueron moderadas.

Tabla 3. Características de la fórmula de trabajo

PROPIEDAD	Norma UNE EN	VALOR	Unidad
Contenido de betún	12.697-6	4,30	% s.m.
Relación filler/betún	12.697-5	1,1	-
Densidad aparente	12.697-8	2,353	g/cm ³
Densidad máxima	12.697-8	2,493	g/cm ³
Huecos en mezcla	12.697-8	5,6	%
Huecos en áridos	12.697-8	15,4	%
Huecos rellenos	12.697-8	63,4	%
Sensibilidad al agua	12.697-12	86	%
Ensayo de rodadura WTS _{aire}	12.697-22	0,067	mm/1000 c
Ensayo de rodadura PRD _{aire}	12.697-22	6,1	%

Tabla 4. Propiedades de la mezcla AC 22 bin 35/50 S semicaliente puesta en obra en el tramo de prueba

PROPIEDAD	F. TRABAJO	T. PRUEBA	Unidad
Contenido de betún	4,30	4,22	% s. m.
Densidad aparente	2,353	2,393	g/cm ³
Densidad máxima	2,493	2,506	g/cm ³
Huecos en mezcla	5,6	4,4	%
Huecos en áridos	15,4	14,0	%
Huecos rellenos	63,4	68,9	%
Sensibilidad al agua	86	91,9	%
Ensayo de rodadura WTS _{aire}	0,067	0,063	mm/1000 c
Ensayo de rodadura PRD _{aire}	6,1	5,6	%

Tabla 5. Resultados de los ensayos de control de producción de la mezcla AC 16 bin 35/50 S semicaliente

PROPIEDAD	MEDIA	DESV. TÍPICA	Unidad
Temperatura de fabricación	131	7	°C
Contenido de betún	4,21	0,17	% s. m.
Densidad aparente	2,354	0,023	g/cm ³
Densidad máxima	2,508	0,011	g/cm ³
Huecos en mezcla	6,1	0,9	%
Huecos en áridos	15,5	2,0	%
Huecos rellenos	63,4	68,9	%
Sensibilidad al agua	87,4	2,7	%

El control de puesta en obra se basó en la extracción de un total de 90 testigos de las capas de mezcla AC 22 bin S 35/50 semicaliente, obteniéndose los espesores, densidades y grados de compactación medios mostrados en la Tabla 6, donde también se indican las respectivas desviaciones típicas. Como puede observarse, no pudo alcanzarse el grado de compactación del 98% especificado para capas de espesor igual o superior a 60 mm, si se adopta como densidad de referencia la obtenida en probetas de laboratorio compactadas a 160 °C.

4.2. Análisis de los resultados

Los resultados presentados en la tabla 5 guardan buena correspondencia con los previstos en la fórmula de trabajo y obtenidos en el tramo de prueba, excepto por los huecos en mezcla que, si bien se encuentran dentro del intervalo especificado, son significativamente más elevados que estos. A pesar de ello, los resultados de sensibilidad al agua son buenos, es decir, no se aprecia efecto alguno de la eventual presencia de humedad residual en la mezcla bituminosa semicaliente, ni se ha precisado incorporar activantes de adhesividad. Aunque en países como Estados Unidos o Francia es muy frecuente recurrir a la adición de hidróxido cálcico para mejorar la resistencia a la acción del agua de las mezclas bituminosas, particularmente de las mezclas semicalientes, en este caso el uso de áridos calizos debe de haber servido para obtener una adhesividad suficiente [5, 7].

La reducción de temperatura sí ha podido afectar a la compactabilidad de la mezcla, pues el grado de compactación no ha alcanzado el 98% especificado para las capas de más de 6 cm de espesor. A este respecto, debe tenerse en cuenta que la densidad de referencia se ha obtenido

Tabla 6. Resultados de los ensayos realizados sobre testigos de la capa intermedia

PROPIEDAD	MEDIA	DESV. TÍPICA	Unidad
Espesor	73	19	mm
Densidad aparente SSS	2,293	0,039	g/cm ³
Densidad de referencia	2,352	0,015	g/cm ³
Grado de compactación	97,3	1,6	%

de probetas compactadas en laboratorio a la temperatura estándar (155-160 °C) que, por tanto, no simulan correctamente las condiciones reales de la compactación en obra. Por otra parte, la reducción de temperatura alcanzada, próxima a 30 °C puede hallarse cerca de los umbrales accesibles a las tecnologías basadas en la espumación del betún, con las que es habitual proponerse objetivos más modestos (15 °C a 20 °C).

5. Valoración ambiental de la mezcla semicaliente producida

Con la reducción de la temperatura de fabricación se han obtenido, y se espera seguir obteniendo, diversas mejoras técnicas y ambientales, entre las que se encuentran las que son objeto de análisis en el presente apartado.

5.1. Demanda energética y emisiones de GEI en la central de fabricación

La demanda energética de una central de fabricación, expresada como consumo de fuel, crece a razón de 0,30 a 0,40 kg/t por cada 10 °C que se incrementa la temperatura de fabricación, dependiendo de diversos factores, entre los cuales deben citarse en primer lugar, la humedad de los áridos y el régimen de funcionamiento de la central 9 y 10. Aunque puede calcularse mediante mediciones directas, cuando se trata de

analizar el efecto de la temperatura o de cualquier otro factor aislado, es conveniente apoyarse en modelos teóricos. En la tabla 7 se presentan los resultados obtenidos recurriendo al modelo ECCO2. Como puede observarse, gracias a la reducción de temperatura alcanzada, se ha estimado que la demanda energética en el quemador del tambor secador ha pasado de 214 a 170 MJ/t, es decir, ha disminuido en un 20,3%. Esta reducción equivale a un 7,9% de la demanda energética del conjunto de las operaciones involucradas en la construcción de la capa bituminosa: aprovisionamiento de materias primas, fabricación, y transporte y puesta en obra.

A partir de los consumos de combustible y mediante los oportunos factores de emisión, pueden calcularse las emisiones de gases de efecto invernadero correspondientes a ambas situaciones. En la tabla 8 se muestran las emisiones unitarias calculadas con el mismo modelo de cálculo y distinguiendo las mismas actividades. Las emisiones de GEI causadas por el quemador del tambor secador de la central han pasado de 17,4 a 13,9 kg de CO₂ eq./t, con una la reducción de emisiones que, obviamente, supone de nuevo un 20,3%. Las emisiones de GEI correspondientes al conjunto de operaciones involucradas en la construcción de la capa bituminosa: aprovisionamiento de materias primas, fabricación, y transporte y puesta en obra, por su parte, se han visto reducidas en un 9,0%.

Tabla 7. Demanda energética de las diversas operaciones de producción y puesta en obra en función de la temperatura de fabricación

DEMANDA ENERGÉTICA (MJ/t)	160 °C	131 °C	Reducción
En la combustión en el tambor secador	213,66	170,36	20,3%
Resto de actividades de fabricación	14,47	14,47	0,0%
FABRICACIÓN	228,12	184,83	19,0%
MATERIAS PRIMAS	257,33	257,33	0,0%
PUESTA EN OBRA	61,41	61,41	0,0%
TOTAL	546,86	503,56	7,9%

Tabla 8. Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de las diversas operaciones de producción y puesta en obra en función de la temperatura de fabricación.

EMISIONES DE GEI (kg de CO ₂ eq./t)	160 °C	131 °C	Reducción
En la combustión en el tambor secador	17,43	13,90	20,3%
Resto de actividades de fabricación	2,01	2,01	0,0%
FABRICACIÓN	19,44	15,91	18,2%
MATERIAS PRIMAS	15,64	15,64	0,0%
PUESTA EN OBRA	4,26	4,26	0,0%
TOTAL	39,34	35,81	9,0%

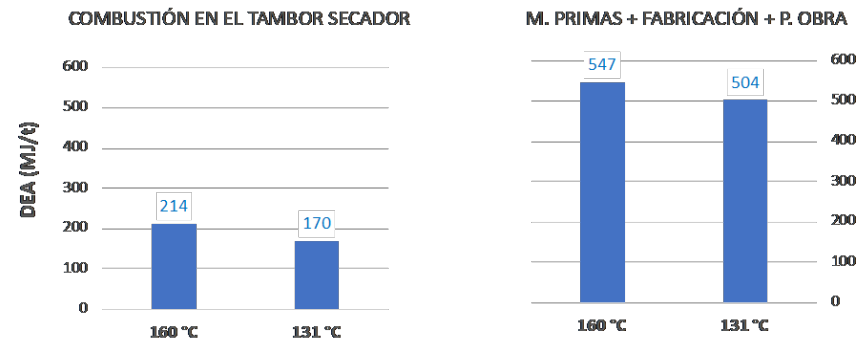


Figura 5. Demanda energética (DEA) de la combustión en el tambor secador de la central de fabricación y del conjunto de operaciones de suministro materias primas, fabricación y puesta en obra

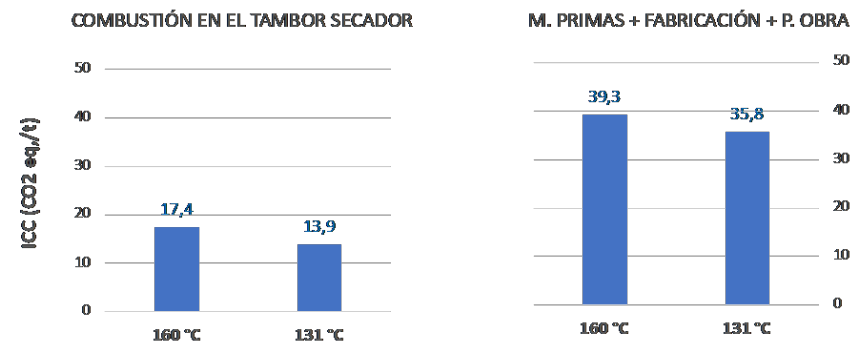


Figura 6. Indicador de cambio climático (ICC) de la combustión en el tambor secador de la central de fabricación y del conjunto de operaciones de suministro materias primas, fabricación y puesta en obra

Las figuras 5 y 6 contienen una representación gráfica de una parte de los resultados presentados en las tablas 7 y 8 anteriores.

5.2. Emisiones de humos y olores

Reducir la temperatura de las mezclas bituminosas en caliente también contribuye a hacer el trabajo de los operarios empleados en la puesta en obra más seguro y confortable, pues además de manipular un material más frío, se ven menos afectados por las emisiones de humos y olores del betún. Los humos de betún, término habitualmente utilizado para referirse a las emisiones totales del betún caliente y de los productos que contienen betún caliente, sólo alcanzan límites de exposición establecidos en las diversas legislaciones europeas después de superar los 180 °C, son apenas significativas por debajo de 150 °C y, virtualmente, desaparecen a temperaturas inferiores a 80 °C; sin embargo, cualquier reducción de emisiones mejora las condiciones de trabajo en la obra [11].

Para estimar las emisiones de humos de betún de la mezcla AC 22 bin 35/50 S semicaliente extendida en la presente obra se ha recurrido a la relación, obtenida por Martin et al. (2019) mediante mediciones reales realizadas en un tramo experimental y representada en la figura 7 [12].

Los resultados de los cálculos efectuados con esta aproximación indican que, gracias a la tecnología de fabricación utilizada, las emisiones de componentes orgánicos volátiles totales (COVT) durante la puesta en obra de la mezcla semicaliente fueron de 44 g/min. Frente a los 119 g/min correspondientes a un extendido convencional (≈150 °C), supuso una reducción de emisiones superior al 63%.

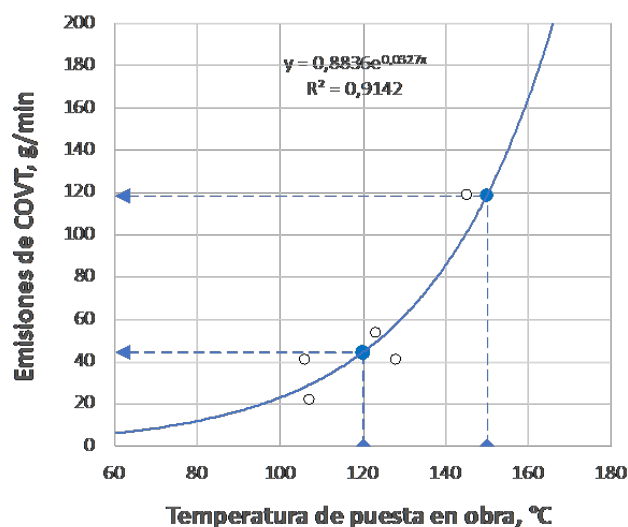


Figura 7. Emisión de componentes orgánicos volátiles totales (COVT) a temperaturas de extendido de 160 °C (mezcla AC 22 bin S 35/50 convencional) y 120 °C (mezcla AC 22 bin 35/50 S semicaliente)

5.3. Envejecimiento del betún y durabilidad de la mezcla

El endurecimiento acelerado del betún asfáltico que tiene lugar durante la fabricación y puesta en obra de las mezclas bituminosas se conoce como envejecimiento a corto plazo, para distinguirlo del envejecimiento a largo plazo que se producirá a lo largo de toda la vida útil del firme, a velocidades muy inferiores. El primero guarda relación, principalmente, con la oxidación y pérdida de componentes volátiles mientras que el segundo involucra fenómenos adicionales como polimerización, tixotropía, sínéresis o separación.

La cinética de las reacciones de oxidación, como la pérdida de componentes volátiles depende de la temperatura del betún y, por tanto, reducir la temperatura de fabricación es útil para limitar el envejecimiento a corto plazo del betún e incrementar la durabilidad de las mezclas bituminosas. Sería preciso contar con modelos de envejecimientos adecuados para estimar cuantitativamente los efectos de la reducción de temperatura alcanzada en la durabilidad de la capa construida; sin embargo, es

indudable que siempre que el fallo del firme guarde relación con el endurecimiento del betún de la capa intermedia, es obvio que con la mezcla AC 22 bin 35/50 S semicaliente se obtendrá una capa más duradera que con la alternativa convencional.

5.4. Otras mejoras

La mezcla AC22 bin 35/50 S semicaliente también aportará ventajas desde el punto de vista de su futura reciclabilidad, pues las mezclas menos envejecidas pueden reutilizarse más fácilmente y con menores costes: se reduce o elimina la necesidad de incorporar agentes rejuvenecedores, y la reutilización puede efectuarse a temperaturas más bajas, en mayores tasas, o dosificando menores proporciones de betún nuevo.

Con las mezclas bituminosas semicalientes también se reducen las afecciones al tráfico pues las capas recién terminadas alcanzan antes la temperatura a la que puede permitirse la circulación de los vehículos. Además, las diversas tecnologías de producción a baja temperatura pueden usarse para incrementar

los tiempos de trabajabilidad de las mezclas bituminosas en caliente y para alcanzar mayores distancias de transporte, si bien estas ventajas no han sido explotadas en la presente obra.

El análisis de ciclo de vida es, sin duda, una herramienta de gran interés para valorar el conjunto de ventajas indicadas, pues ayuda a evitar comparaciones de alternativas basadas en contabilidades incompletas y permite tomar en cuenta las ventajas potenciales futuras.

6. Conclusiones y recomendaciones

En las obras de rehabilitación del firme de la autovía A-23, entre los PPKK 250,700 al 277,600 (Zaragoza), ejecutadas entre 2020 y 2021, se han puesto en obra unas 30.000 t de mezcla AC 22 bin 35/50 S semicaliente, fabricadas exitosamente mediante la tecnología de espumación directa del betún, a una temperatura media de 131 °C, es decir unos 30 °C por debajo de la temperatura típica de una producción convencional en caliente. A la luz de la presente experiencia, no parece necesario introducir ensayos distintos de los empleados con las mezclas bituminosas en caliente convencionales para el diseño o en el control de las mezclas bituminosas semicalientes, una vez comprobado que con estas mezclas pueden cumplirse los requisitos de sensibilidad al agua, donde podría manifestarse el efecto de la presencia de humedad residual, y de resistencia a la deformación permanente, que es la propiedad que más puede verse afectada por un menor envejecimiento a corto plazo del betún de las mezclas semicalientes.

Durante el control de puesta en obra se ha medido un grado de compactación promedio de 97,3 %, que

inferior al 98 % especificado. Es una diferencia que podría atribuirse a las distintas temperaturas de compactación empleadas en obra y en laboratorio, aunque tampoco puede descartarse que reduciendo en más de 30 °C la temperatura de fabricación se haya sobrepasado el límite al alcance de la tecnología de espumación utilizada, pues se trata de una reducción que supera ampliamente los 15 °C a 20 °C mucho más habituales.

De acuerdo con los análisis expuestos, las mezclas bituminosas producidas a bajas temperatura ofrecen interesantes ventajas técnicas, económicas y ambientales, algunas de las cuales deben valorarse mediante Análisis de Ciclo de Vida y que guardan relación con la durabilidad de las capas construidas y con su reciclabilidad futura.

Como es natural, reducir la temperatura de fabricación también presenta algunos inconvenientes. La opción más frecuentemente utilizada internacionalmente y, sin duda, la más recomendable para reducir lo eliminar los derivados de la presencia de humedad residual o del menor endurecimiento de su betún, consiste en incorporar una cierta proporción de hidróxido cálcico (1 a 2% de la masa de la mezcla de áridos) que, además de actuar como rigidizador de la mezcla bituminosa, mejora su resistencia a la acción del agua.

En futuras actuaciones se recomienda analizar si modificando las temperaturas estándar de compactación de probetas laboratorio, para aproximarlas mejor a las temperaturas empleadas en condiciones reales, se obtendrían densidades de referencia distintas y resultados más coherentes con el grado de compactación obtenido en obra. Para no perder representatividad, las probetas de laboratorio deberían confeccionarse in situ, al menos, mientras no

se disponga de correlaciones entre los resultados de estas probetas y las elaboradas en laboratorio recalentando mezcla bituminosa semicaliente. También sería interesante analizar en qué aspectos y en qué medida, en su caso, modificar la temperatura de compactación de las probetas afecta al diseño de mezclas.

Referencias

1. Croteau, J. Tessier, B. (2008): Warm mix asphalt paving technologies: a Road Builder's perspective. Warm Asphalt Technology as a Sustainable Strategy for Pavements" Session of the 2008 Annual Conference of the Transportation Association of Canada
2. Reinhold Ruhl, R. and Musanke, U. (2006): The German Bitumen Forum. Cooperation in partnership. Annals of Occupational Hygiene, Vol. 50, No. 5.
3. EAPA (2021). Asphalt in figures 2020. European Asphalt Pavement Association, Brussels.
4. D'Angelo, J., Harm, E., Bartoszek, J., Baumgardner, G., Corrigan, M., Cowser, J., Harman, T., Jamshidi, M., Jones, W., Newcomb, D., Prowell, B., Sines, R. and Yeaton, B. (2008): Warm-Mix Asphalt: European Practice. International Technology Scanning Program, FHWA-AASTHO, February 2008.
5. Ortiz Ripoll, J.; Crisén, X. y Giralt, Julia (2022): Mezclas bituminosas semicalientes producidas a temperaturas inferiores a 120 °C. Proyecto ASFALTMÍN. Revista RUTAS de la Asociación Técnica de Carreteras. Número 190, enero-marzo de 2022.
6. Prowell, B. D.; Hurley, G. y Frank, B. (2012): Warm Mix Asphalt. Best Practices. Quality Improvement Publication 125, 3rd Edition. Na-

tional Asphalt Pavement Association.

7. Veá, F.; Payán, J.; Sedeño, J.; García Serrada, C.; Hidalgo, E.; Loma, J.; Simón, J.; Orozco, R.; Álvarez, P.; Berbis, J. y Moreno, E. (2022): Experiencia espuma betún. Revista RUTAS de la Asociación Técnica de Carreteras (ATC), número 191, abril-junio de 2022.
8. López Marco, J. R.; Berbis, J.; Albert, J. R. Felipe, J. y Moral, A. (2016): Mezclas bituminosas recicladas semicalientes con espuma de betún. Revista Asfalto y Pavimentación, número 21, volumen VI, segundo trimestre de 2016.
9. Kennedy, T. y Huber, G. (1984): The effect of mixing temperature and stockpile moisture on asphalt mixtures. Center for Transportation Research. The University of Texas at Austin. Research report 358-1.1984.
10. Bueche, N. (2013) : Évaluation des performances et des impacts des enrobés tièdes. Thèse nom. 5169. École Polytechnique Fédérale de Lausanne 2013.
11. NC (2015): The bitumen industry. A global perspective. Production, use, specification, and occupational exposure Third edition. IS-230. Asphalt Institute Inc. and European Bitumen Association-Eurobitume.
12. Martin, H., Kerstin, Z., & Joachim, M. (2019). Reduced emissions of warm mix asphalt during construction. Road Materials and Pavement Design. Vol. 20. ♦