

# Revisión de las nuevas tecnologías de fabricación de mezclas bituminosas a baja temperatura



Margarita Martínez-Díaz  
Ignacio Pérez  
Luis E. Romera-Rodríguez

Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos  
Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos  
Doctor Ingeniero Industrial

UNIVERSIDADE DA CORUÑA. ETSI Caminos, Canales y Puertos. Área de Ingeniería e Infraestructura del Transporte. Campus de Elviña, s/n - 15071 A Coruña. Tfno: +34 981 167000.  
margarita.martinez@udc.es

Recibido: 04/10/2012 • Aceptado: 10/12/2012

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5410>

## REVIEW OF WARM MIX ASPHALT NEW TECHNOLOGIES

### ABSTRACT

- Since signing the Kyoto Protocol, efforts in the search of processes to slow climate change down have been increased. In the case of the manufacture of bituminous mixtures, new products and procedures that allow a significant reduction of emissions of greenhouse fumes and consumption of energy resources, keeping the demanded benefits, have been developed. However, there is still some reluctance to use them, due to the ignorance of the manufacturers about the changes needed in the asphalt plants to adapt their technology, as well as about the economic consequences of their use. Therefore, this paper shows an analysis of the key technologies used to manufacture mixtures at low temperature that exist nowadays. Changes in plants to incorporate these new technologies are detailed, and an economical and environmental balance that compares the manufacture of these mixes with the traditional hot mixes is carried out. Everything with the aim of encouraging producers and Authorities to employ these new products, both effective, environmentally sustainable and profitable.
- **Keywords:** sustainable development, half-warm mix asphalt, warm mix asphalt, asphalt plants, industrial adaptation, emissions, consumptions, costs, life-cycle analysis.

### RESUMEN

Desde la firma del Protocolo de Kioto se han incrementado los esfuerzos en la búsqueda de nuevos procesos que frenen el cambio climático. En el caso de la fabricación de mezclas bituminosas, se han desarrollado nuevos productos y procedimientos que permiten una disminución significativa de las emisiones de gases de efecto invernadero y del consumo de recursos energéticos, conservando las prestaciones requeridas. Sin embargo, todavía existe cierta reticencia al uso de los mismos, debido al desconocimiento de los fabricantes sobre los cambios a incorporar en las plantas asfálticas para adaptar su tecnología, así como de las consecuencias económicas de su empleo. Por lo tanto, en este trabajo se muestra un análisis de las principales tecnologías de fabricación de mezclas bituminosas a baja temperatura presentes en la actualidad. Se detallan los cambios a realizar en las plantas para poder incorporar estas nuevas tecnologías y se realiza un balance económico y ambiental que compara la fabricación de estas mezclas con las tradicionales fabricadas en caliente. Todo ello con el objetivo de alentar a los productores y Administraciones a que empleen estos nuevos productos, a la vez eficaces, ecosostenibles y rentables.

**Palabras clave:** desarrollo sostenible, mezclas templadas, mezclas semicalientes, plantas asfálticas, adaptación industrial, emisiones, consumos, costes, análisis de ciclo de vida.

### 1. INTRODUCCIÓN

Desde la firma del *Protocolo de Kioto*, se ha investigado en el desarrollo de nuevos procesos y productos que minimicen los

daños medioambientales causados durante la fabricación y puesta en obra de las mezclas asfálticas convencionales. Así, diferentes mezclas bituminosas han sido desarrolladas con este objetivo, por ejemplo: mezclas en frío o bien mezclas que incorporan material reciclado o polvo de caucho. No obstante, ninguna de estas mezclas ha conseguido alcanzar propiedades mecánicas similares a las de las mezclas bituminosas fabricadas en caliente. Sin embargo, las tecnologías de fabricación de mezclas bituminosas a baja temperatura combinan el cuidado del medio ambiente con un adecuado comportamiento estructural del material.

Por esta razón, el empleo de mezclas bituminosas fabricadas a baja temperatura constituye un avance importante para la industria del sector en los últimos 50 años. En este contexto, se considera como precursor de este tipo de mezclas al profesor de la Universidad Estatal de Iowa *Ladis Csanyi*, que en 1956 fabricó el primer betún espumado con vapor [1].

Desde entonces se han desarrollado numerosos estudios en relación a este tema tanto en EEUU como en Australia y Europa, siendo en este último continente en el año 1999 donde se tuvo constancia del primer uso de mezclas fabricadas a baja temperatura, concretamente en Noruega y con el método *Wam Foam*. De esta forma, en la actualidad existen diversas tecnologías desarrolladas para la fabricación de este tipo de asfaltos. Se estima que más de cuarenta son ya conocidas a nivel internacional, aunque existen otras en proceso de investigación que buscan mejorar varios de los aspectos relacionados con su uso.

No obstante, es en EEUU donde más esfuerzos se están realizando para su implantación. Así, en la actualidad más de 45 estados norteamericanos cuentan con tramos de prueba y carreteras en los que se han empleado diferentes tecnologías de mezclas a baja temperatura, y la *National Asphalt Pavement Association* (NAPA) estima que en cinco años más de la mitad de las mezclas extendidas en EEUU serán de este tipo. Además, países de Europa como Alemania, Francia, Noruega y España también emplean algunos de estos procesos, aunque su grado de implantación es menor y normalmente unido a la construcción de carreteras de bajo tráfico o a reparaciones [2, 3].

Una de las razones de esta situación puede ser la falta de una normativa concreta que regule el empleo de estas mezclas, hasta ahora fabricadas siguiendo las pautas marcadas para las mezclas en caliente, sumado al desconocimiento por parte de productores y Administraciones sobre las inversiones que exigen estos productos y sobre las posibilidades de amortización de dichas inversiones.

Por ello, numerosos organismos de investigación están estudiando aspectos referentes a la fabricación y puesta en obra para el desarrollo de una normativa especializada. Así, EEUU, algunos países europeos e incluso Andalucía en España, ya cuentan con unas recomendaciones básicas [4, 5, 6]. Por otra parte, en lo relativo a las inversiones requeridas, en este artículo se presenta una revisión de las principales tecnologías existentes así como los cambios requeridos en

las plantas asfálticas para su desarrollo. Además, también se presenta una comparación entre una mezcla tradicional fabricada en caliente y tres mezclas de baja temperatura de diversas tipologías, analizadas desde los puntos de vista económico y medioambiental.

Finalmente, el objetivo de este artículo es alentar a los productores y Administraciones al empleo de estos nuevos productos, a la vez eficaces, ecosostenibles y rentables.

## 2. MEZCLAS FABRICADAS A BAJA TEMPERATURA

Las mezclas bituminosas se pueden clasificar en función de su temperatura de fabricación. Así, dentro de la denominación general de mezclas a baja temperatura se encuentran las mezclas templadas (*half-warm mix asphalt*), fabricadas a temperaturas entre 50 y 100 °C, y las semicalientes (*warm mix asphalt*), fabricadas a temperaturas entre 100 y 150 °C.

De esta forma, sus principales ventajas medioambientales y sociales frente a las mezclas en caliente son [1,7]:

1. Disminución entre un 30 y un 70% de las emisiones de gases de efecto invernadero durante su fabricación y extendido, debido a las bajas temperaturas de producción.
2. Ahorro en el consumo de combustible debido a las bajas temperaturas de producción.
3. Mayor seguridad y comodidad para los trabajadores, que no tendrán que trabajar a tan altas temperaturas y que estarán en ambientes menos contaminados.

Además, las principales ventajas desde el punto de vista técnico-económico son [1,7]:

1. Fácil adaptación de las plantas en caliente y de los equipos de compactación de las mezclas tradicionales, ocasionando pequeños sobrecostos iniciales que se verán compensados por los ahorros en otros ámbitos.
2. No presentan dificultades para los trabajadores, que seguirán las pautas esenciales de las mezclas en caliente con sencillas variantes.
3. Mayor trabajabilidad y buena compactibilidad a bajas temperaturas.
4. Mayores tiempos admisibles de transporte, ya que se enfrían más lentamente que las mezclas en caliente. Esto permite ampliar el radio de acción de las plantas.
5. Mayor período estacional de pavimentación y posibilidad de trabajar de noche debido a la necesidad de menores temperaturas de trabajo, incrementando la productividad.
6. Posibilidad de lograr una mejor compactación final y una mayor disminución del volumen de huecos en mezcla, implicando una mejora de propiedades mecánicas como: durabilidad, sensibilidad al agua, resistencia a la formación de roderas, resistencia a fatiga, etc.

7. Posibilidad de pavimentar en espesores gruesos y abrir al tráfico al poco tiempo, lo que las hace aptas para trabajos de reparación.
8. Posibilidad de emplear gran cantidad de material asfáltico reciclado, al dotar a la mezcla de trabajabilidad.

Finalmente, las principales tecnologías existentes y desglosadas en la Tabla 1, se pueden dividir en tres grandes grupos [8]:

1. Las que emplean *aditivos orgánicos*.

Estos aditivos, que pueden ser de diversos orígenes, tienen un punto de fusión menor que el del betún, a partir del cual tienden a disminuir la viscosidad del mismo.

2. Las que emplean *aditivos químicos*.

Generalmente se trata de un conjunto de varios aditivos

que se incorporan a la vez al betún para modificar propiedades como su adhesividad, su tensión superficial, etc., tratando de fomentar su capacidad de envuelta de los áridos.

3. Las que espuman en *betún*.

Estas tecnologías pueden basarse simplemente en el empleo de aparatos mecánicos que inyecten agua a presión en el betún o en la adición de productos como las zeolitas, naturales o sintéticas, que contienen agua encapsulada, la cual es liberada cuando se ponen en contacto con el betún caliente. También existen otros procesos como la adición de una parte de la arena fina en estado húmedo. Estos procesos provocan que el betún adquiera forma de espuma durante cierto tiempo, durante el cual es capaz de envolver fácilmente a los áridos de la mezcla. En la Figura 1 se esquematizan ejemplos de cada una de las variantes de este grupo de tecnologías.

PRINCIPALES TECNOLOGÍAS PARA LA FABRICACIÓN DE MEZCLAS A BAJA TEMPERATURA	
ADITIVOS ORGÁNICOS TIPO CERA	ESPUMACIÓN NO MECÁNICA
Sasobit	Advera WMA
Asphaltan A y Romonta N	Aspha-min
Asphaltan B	LEA (Low Energy Asphalt), EBE y EBT
Licomont BS 100 y Sübit	LEA (Low Emission Asphalt)
3E LT, Ecoflex y Ecolastic	LEAB
SonneWarmix (Ecobit)	WAM-Foam
ADITIVOS ORGÁNICOS DE ORIGEN MINERAL O VEGETAL	ESPUMACIÓN MECÁNICA
Shell Thiopave	Aquablack
Astech PER (Hydrogreen)	Double Barrel Green
TLA-X Warm Mix	LT Asphalt
Vegecol	Terex WMA
Biophalt	Ultrafoam GX
Floraphalt	Ecofoam II
MODIFICADORES A BASE DE ADITIVOS QUÍMICOS	HGrant WM System
Revix (familia Evotherm 3G)	Accu-Shear
Evotherm 3G	Aquafoam
Evotherm DAT	Meeker Warm Mix
Cecabase RT	Tri-Mix Warm Mix Injection System
Rediset WMX	EMULSIONES ADITIVADAS
Qualitherm	Evotherm ET (con aditivos químicos)
Hypertherm	Ecomac (con aditivos orgánicos vegetales)
Recibet	<b>CLASIFICACIÓN:</b> Negro: mezclas semicalientes Verde: mezclas templadas
Cepsasfalt BT	
Styrelf BT	

Tabla 1: Tecnologías más relevantes para la fabricación de mezclas a baja temperatura. (Fuente: elaboración propia)

### 3. ADAPTACIÓN DE LAS PLANTAS ASFÁLTICAS EXISTENTES

Antes de analizar estos cambios, se explicarán brevemente las principales características de las plantas asfálticas convencionales para la fabricación de mezclas en caliente.

### 3.1. PRINCIPALES TIPOLOGÍAS DE PLANTAS ASFÁLTICAS

Las plantas asfálticas son muy diversas y generalmente están adaptadas al material de fabricación y a la producción esperada. Entre las más comunes se pueden encontrar dos

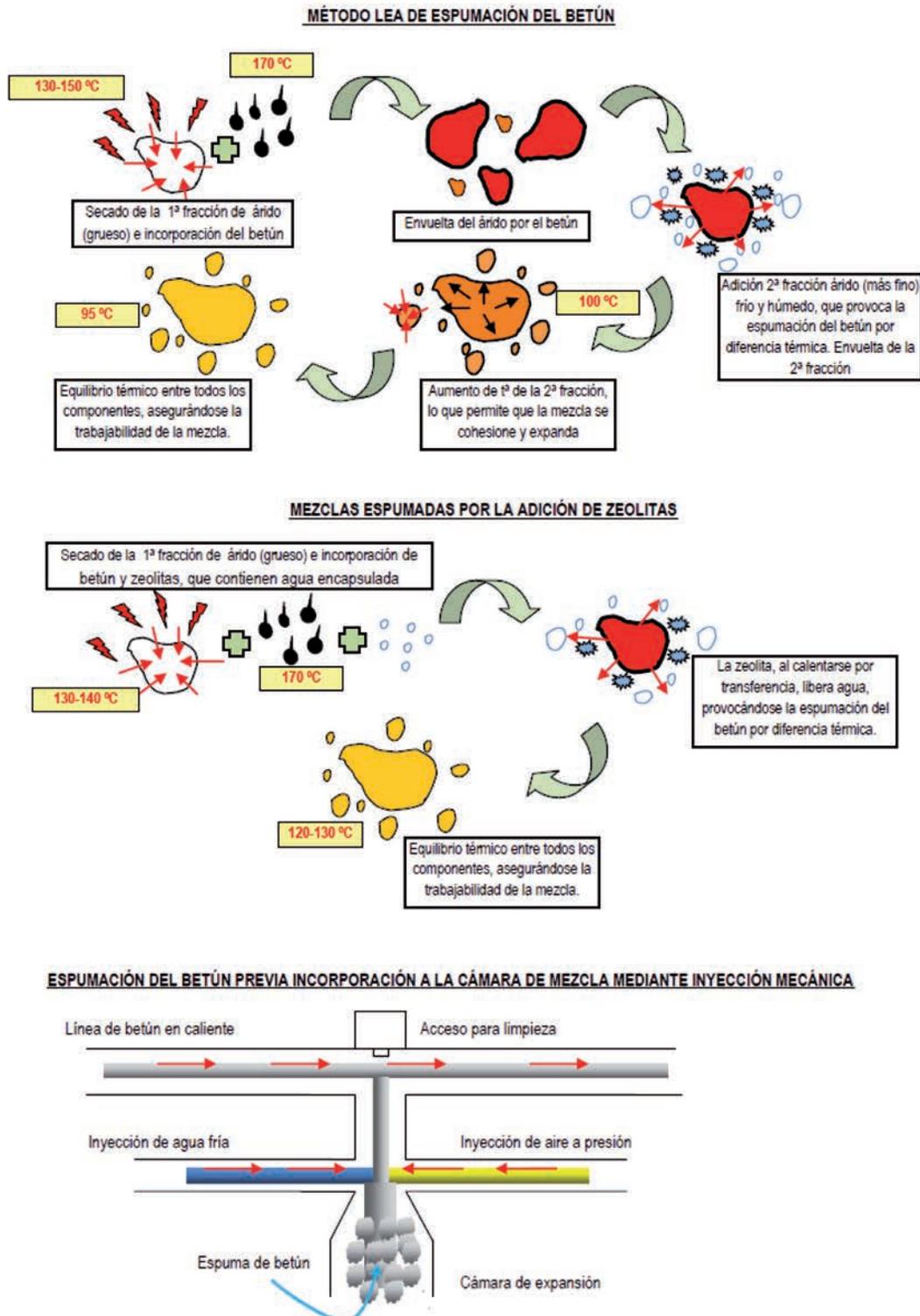


Fig. 1: Variantes de tecnologías de espumación de betón. (Fuente: elaboración propia)

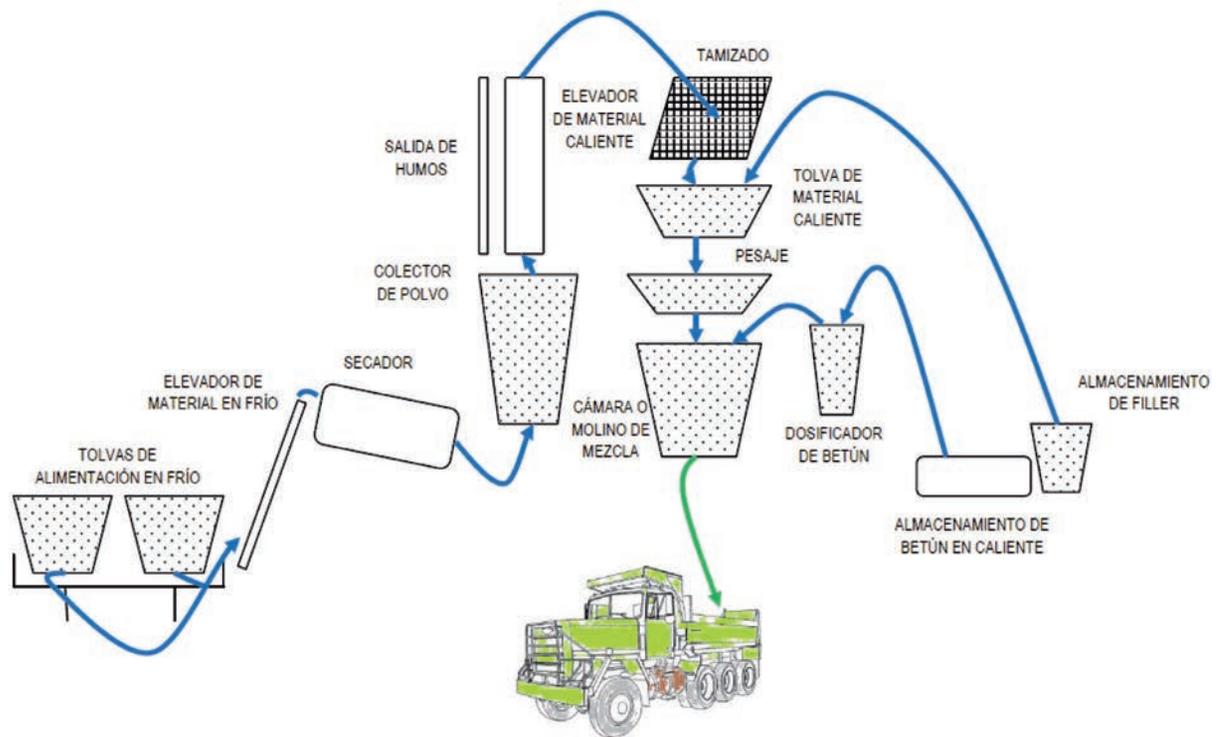


Fig. 2: Componentes básicos de una planta asfáltica discontinua. (Fuente: elaboración propia)

grandes grupos: plantas discontinuas y plantas continuas. Las plantas discontinuas se caracterizan porque el árido y el betún previamente calentados se mezclan en las cantidades adecuadas para fabricar una sola amasada de mezcla. La Figura 2 muestra las unidades principales de estas plantas.

Así, el proceso de fabricación comienza tomando los áridos en cantidades controladas de su lugar de almacenamiento y llevándolos a un secador donde se secan, calientan y tamizan para separarlos en las fracciones deseadas, las cuales

se almacenan en tolvas separadas a temperatura constante. A continuación se toma de cada fracción la cantidad requerida y dosificada generalmente en peso. A estos áridos se les añaden en el mezclador el *filler* (polvo mineral, inferior a 0.063 mm) y el betún necesario, dosificado y a la temperatura adecuada. Finalmente, después de fabricar la amasada se vacía la unidad de mezcla y se considera finalizada la operación.

Sin embargo en las plantas continuas como la mostrada en la Figura 3, la dosificación de los materiales se realiza

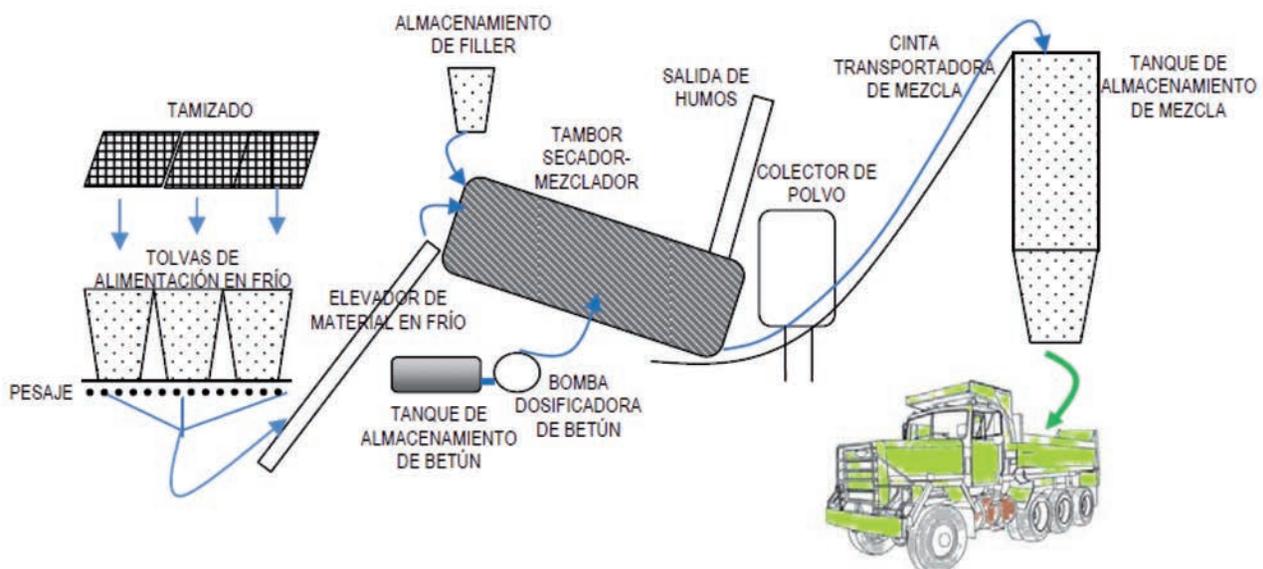


Fig. 3: Componentes básicos de una planta asfáltica continua. (Fuente: elaboración propia)

de forma ininterrumpida, obteniéndose un flujo continuo de mezcla. Por ello cuentan con un tanque de almacenamiento para las mezclas fabricadas. Además, en estas plantas se seca y calienta el árido en el mismo tambor en el que se mezcla con el betún.

La fabricación comienza con la alimentación en frío de las distintas fracciones de áridos, que es ajustada cambiando la velocidad de transporte de las cintas de descarga. Al realizarse la dosificación de los áridos en frío, cada peso registrado incluye una parte correspondiente a humedad. Por ello han de realizarse ensayos previos de laboratorio que determinen el porcentaje de ésta y que permitan conocer el peso real de cada árido introducido en el tambor.

Además, los mezcladores empleados y su modo de funcionamiento pueden ser muy diferentes. Uno de los casos más habituales es aquel en el que los áridos se introducen en el mezclador por la parte más cercana al quemador, por lo que áridos y gases llevarán la misma dirección en su interior. De este modo el betún, introducido en la parte intermedia, se protege en cierta medida de la oxidación por contacto directo con el quemador, gracias al espacio físico que ocupan los áridos y sobre todo al agua que contienen, que se evapora y humedece el ambiente.

El calentamiento y mezcla de los diferentes materiales dentro del tambor también sigue una secuencia definida. En un proceso tradicional de mezcla en caliente, la temperatura interior del tambor secador-mezclador sube gradualmente. En primer lugar se introducen los áridos, que se consideran secos cuando dicha temperatura es de 170-180 °C. Cuando se alcanzan los 180-200 °C, se introduce el betún. A estas temperaturas, el betún se espuma por contacto directo con la humedad que permanece en el tambor, por lo que aumenta su volumen y se incrementa su capacidad de envuelta. La temperatura del tambor sigue ascendiendo hasta que la humedad desaparece por completo. Finalmente, una vez que la mezcla ya está fabricada, un medio elevador a alta temperatura la transporta a un tanque de almacenamiento, donde se mantiene a temperatura constante hasta el momento de su utilización.

### 3.2. ADAPTACIÓN A LAS TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN DE MEZCLAS DE BAJA TEMPERATURA

En general, la incorporación de las tecnologías de baja temperatura a las plantas asfálticas tradicionales no exige grandes modificaciones. Sólo procesos muy concretos, fundamentalmente de espumación mecánica del betún, requieren la instalación de maquinaria específica y patentada.

Los aspectos generales que se deben tener en cuenta para conseguir un resultado óptimo son:

1. La temperatura de los gases de salida tras el secado y/o la fabricación ha de mantenerse por encima de su punto de condensación a pesar de las bajas temperaturas de trabajo, para que no haya obstrucciones. Un buen aislamiento, un control exhaustivo de estas temperaturas y otras medidas como precalentar el

filtro de mangas pueden lograr este objetivo [8].

2. En necesario ajustar la velocidad del tambor de secado para conseguir que los áridos alcancen la temperatura deseada. Además, si se van a fabricar mezclas con muchos finos, es conveniente contar con precalentadores para el *filler*.
3. Los áridos deben estar secos antes del mezclado y, tras éste, deben quedar completamente envueltos en ligante. Si fuese necesario, habría que extender el tiempo de mezclado o cambiar la secuencia de adición de componentes a la mezcla.
4. La temperatura de producción y los tiempos de almacenamiento y transporte se deben planificar con el objetivo de alcanzar la temperatura de compactación deseada, que será el parámetro de partida para los cálculos [4] junto con la temperatura ambiente. Como media, a una temperatura externa de entre 10 y 20 °C, y para un tiempo de transporte de 30 minutos, el descenso de la temperatura de la mezcla ronda los 15-20 °C.
5. Para mantener la calidad, no se debe alternar en un intervalo de tiempo reducido la fabricación de mezclas en caliente con las mezclas semicalientes o templadas. Aunque los cambios a realizar son relativamente sencillos, han de ser precisos, y requieren de tiempo y de una organización cuidada. Tampoco se deben emplear diferentes betunes base, pues las fórmulas de trabajo en este tipo de mezclas son muy exactas, y cualquier alteración aparentemente pequeña puede dar lugar a grandes cambios en el producto final.

Además, cada tecnología de mezcla de baja temperatura exige cambios en los equipos y/o procesos. Por ejemplo, la mayor parte implican la adición de algún producto que disminuya la viscosidad del betún y/o que mejore la adhesividad entre áridos y ligante. Existen numerosas formas de introducir estos aditivos en la mezcla, como son:

1. En el caso sencillo, la planta puede adquirir directamente betún ya aditivado en su central de suministro.
2. De otro modo, habrá que dotar a la planta de algún elemento que permita añadir dichos componentes durante la fabricación, por vía húmeda o por vía seca. En el primero de los casos, el aditivo es mezclado previamente con el betún para posteriormente añadir el conjunto a la cámara de mezcla. En el segundo caso, se introduce en la línea de producción justo antes de la cámara o directamente en ella, mezclándose en su interior con el resto de los componentes. Siempre se debe garantizar que su distribución sea homogénea.

La práctica demuestra que los mejores resultados se obtienen adquiriendo betún ya modificado, o bien introduciendo en la planta los aditivos en el betún. Sin embargo, la introducción de estos aditivos directamente en la cámara de mezcla, sobre todo si son aditivos orgánicos tipo cera, se debe dejar como última opción [10].

Por otro lado, los aditivos pueden ser suministrados en forma líquida o sólida:

1. Si a pesar de los riesgos se decide realizar la unión de los diferentes componentes en la cámara de mezcla, al menos deberán emplearse aditivos en forma líquida. Deberá cambiarse la secuencia de mezclado, realizándose uno previo durante unos 15 segundos sólo de betún, finos, *filler* y aditivo, y añadiéndose posteriormente el árido grueso, tras lo cual se agitará la mezcla durante otros 15 segundos. De este modo, se calcula que el tiempo de fabricación por amasada se incrementa en unos 65 segundos [11]. Ahora, si los aditivos son líquidos y se añaden al tanque del betún, los tiempos no han de ser modificados. Este tanque habrá de disponer de unidades agitadoras de baja velocidad que favorezcan su distribución y de una bomba volumétrica que los vierta en dicho tanque previa dosificación.
2. Si los aditivos se adquieren en forma sólida, muchas plantas pueden aprovechar elementos preexistentes por ejemplo para la adición de fibras o de material procedente de fresado. En caso de que carezcan de ellos, bastará con incorporar un alimentador neumático o una tolva dosificadora. Si se quieren introducir en la línea de alimentación de betún, se deben pasar previamente por un sistema de fusión o por un eyector. En el primer caso, el aditivo, una vez en estado líquido tras pasar por el sistema, se vierte directamente en el depósito de betún, que estará caliente y se mezclará con él. En el segundo caso, el eyector actúa como una bomba hidráulica. El betún a modificar se introduce en una zona estrecha de la tubería. Se crea un vacío que genera una corriente ascendente por dicha sección y que atrae a los aditivos hacia el flujo de betún, favoreciendo una distribución homogénea de los mismos. Como la temperatura del betún es mayor que la del punto de fusión de los aditivos, éstos se disuelven en la fase líquida del betún. Ninguno de los dos métodos anteriores requiere incrementar los tiempos de mezcla.



Fig. 4: Alimentador de fibras para la adición de zeolita [3]

A las medidas anteriores descritas habrá que añadir otras en casos particulares. Por ejemplo, si se emplean emulsiones, como en el caso de *Evotherm ET*, éstas han de ser almacenadas a una temperatura de 80 °C, por lo que la planta debe contar con un tanque térmicamente controlado.

Caso aparte son las tecnologías de espumación del betún, tan diversas como sus requerimientos de adaptación.

Para la espumación por medio de zeolitas, lo habitual es introducirlas directamente en la cámara de mezcla, previamente dosificadas, y antes de verter el betún. Al ser suministradas en forma de polvo, su proporción ha de ser contabilizada como parte del *filler* [13]. Se introducen junto a éste o justo después, y la mezcla debe ser removida al menos durante 5 segundos antes de introducir el betún. Se puede emplear cualquier tipo de sistema de dosificación y alimentación existente en la planta (ver Fig. 4 y 5), por ejemplo un alimentador de fibras o de reciclado y, sólo si la cantidad a introducir es muy pequeña, sería viable añadirlas a la mezcla manualmente. También cabe la opción de adquirir betún previamente modificado con zeolita, pero dada su gran facilidad para distribuirse homogéneamente en el betún, es poco frecuente.

Por su parte, los elementos principales de las tecnologías de espumación mecánica son los sistemas de adición del



Fig. 5: Llenado del alimentador mediante maquinaria de descarga de sacos a granel, o a través de su conexión a un silo [3]



Fig. 6: Equipo de espumación de betún Terex. (Fuente: folleto fabricante)

agua y/o las bombas, boquillas, etc. Los productores de dichas tecnologías ofrecen ya a las plantas asfálticas equipos completos que pueden ser anexionados de forma sencilla, como el “kit” de la Figura 6.

Por regla general, las boquillas de espumación han de ser instaladas en línea con los alimentadores de betún y se debe completar la misma con un tanque de reserva, una bomba y un dosificador de agua. Suele ser frecuente la disposición de una cámara de expansión para el betún espumado, y una unidad de control específica que regule la cantidad de agua añadida.

#### 4. ANÁLISIS ECONÓMICO Y MEDIOAMBIENTAL DE LAS MEZCLAS DE BAJA TEMPERATURA FRENTE A LAS MEZCLAS TRADICIONALES EN CALIENTE

Debido a la amplitud de casos, se ha particularizado el análisis para el caso de mezclas y plantas habituales en el mercado español, como es el caso de las mezclas continuas (contienen porcentajes de todos los tamaños de áridos) fabricadas en plantas discontinuas. En la Tabla 2 se comparan los costes de una mezcla tradicional en caliente y tres mezclas fabricadas a baja temperatura pertenecientes a cada uno de

los grandes grupos descritos en el apartado 2. El caso estudiado se basa en datos obtenidos en Galicia, en una obra que requirió la fabricación y extendido de unas 35.000 tn de mezclas bituminosas en caliente y para la cual se utilizó una planta discontinua tipo INTRAME UM 260 T.

De esta forma, para el análisis de las mezclas a baja temperatura se han mantenido los datos coincidentes, mientras los propios de cada tecnología se han contrastado con sus productores así como con experiencias españolas [14,15] y norteamericanas [16, 17, 18]. Se han empleado datos medios, que en cada caso concreto habría que ajustar en función de factores como la temperatura exacta de mezcla y la de extendido. Los costes de implantación señalados dependen del modo de aplicación de la tecnología según lo explicado, pero en todo caso se puede deducir de su baja cuantía que son fácilmente amortizables. Es cierto que existen otras tecnologías de mezclas a baja temperatura que requieren inversiones iniciales mayores (y que suelen proporcionar ventajas adicionales), pero la mayoría no suponen grandes sobrecostes.

Es importante destacar que la capacidad de producción de la planta no se altera a temperaturas de mezclas semicalientes, pudiendo disminuir muy levemente en el caso de las mezclas templadas, que en ocasiones requieren un incremento en el

MEZCLAS	MEZCLAS BAJA TEMPERATURA			MEZCLA CONVENCIONAL EN CALIENTE
	ADITIVOS ORGÁNICOS	ADITIVOS QUÍMICOS (Evotherm en emulsión)	ESPUMACIÓN (Aspha-min)	
Coste aproximados instalación* (€)	0-30.000	mínimos	0-30.000	-
Coste aprox. licencias uso (€)	0	0	0	-
Coste material tecnología (€/Tn)	1.372,80	486,00	1.029,60	-
Cantidad recomendada	1,5-3,0% s/betún	100 % s/betún	0,3% s/mezcla	-
Coste aproximado tecnología (€/Tn mezcla)	1,37	24,30	3,09	-
Coste aproximado tecnología + ligante*1 (€/Tn mezcla)	23,87	24,30	25,59	22,50
Ahorro medio en consumos frente a mezclas en caliente (%)	20,00	50,00	30,00	-
Consumo combustible*2 (l/tn)	6,08	3,80	5,32	7,60
Coste combustible (€/l)	0,70	0,70	0,70	0,70
Coste combustible (€/tn)	4,26	2,66	3,72	5,32
Consumo electricidad (KWh/tn)	7,20	4,50	6,30	9,00
Coste electricidad (€/KWh)	0,17	0,17	0,17	0,17
Coste electricidad (€/tn)	1,22	0,77	1,07	1,53
Coste aproximado áridos (€/tn)	9,03	9,03	9,03	9,03
Gastos generales aprox. planta (€/tn)	1,52	1,52	1,52	1,52
Costes aprox. extendido (€/tn)	7,72	7,72	7,72	7,72
Total coste mezcla (€/tn)	47,62	45,99	48,65	47,62
Total ahorro frente a mezclas en caliente (%)	0,00	3,41	-2,17	-

\* para una planta discontinua convencional. Para una planta continua serían similares.  
\*1 supuesta una media de un 5% de betún.  
\*2 para un árido con un 2-4 % humedad, e incluyendo transportes intermedios.

Tabla 2: Comparación de costes entre mezclas en caliente y mezclas fabricadas a baja temperatura. (Fuente: elaboración propia a partir de datos proporcionados por una empresa constructora y por los productores de las diferentes tecnologías, completados con los contenidos en los artículos referenciados)

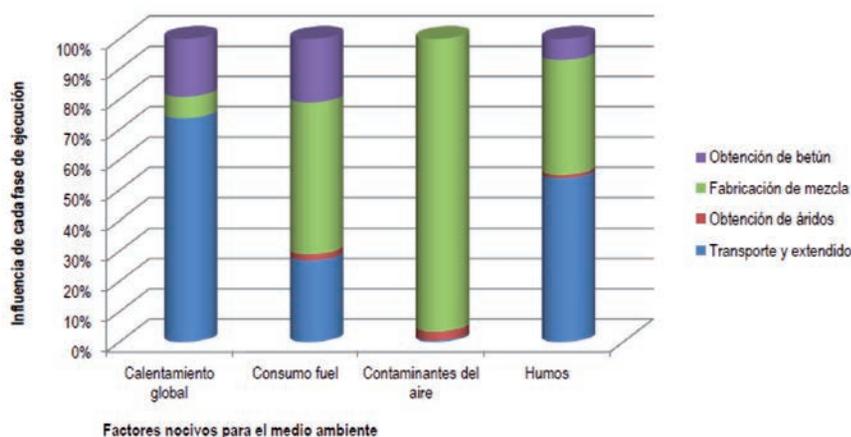


Fig. 7: Análisis ambiental de los diferentes procesos incluidos en la fabricación de mezclas en calientes [16,17]

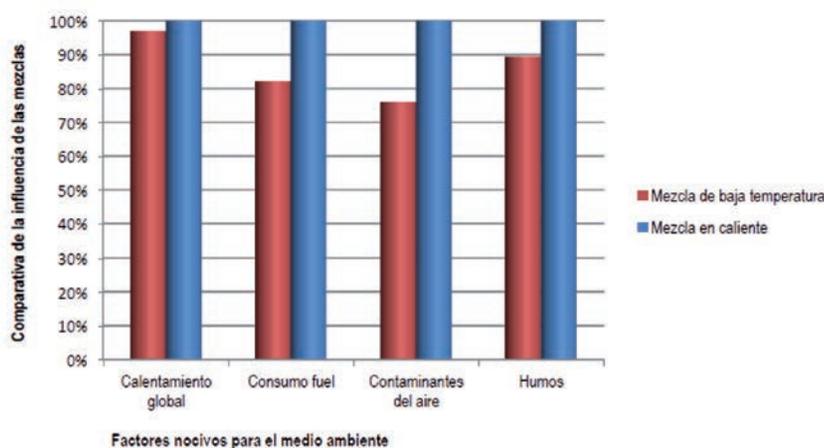


Fig. 8: Comparación de la sostenibilidad de las mezclas fabricadas en caliente y las de baja temperatura [17, 18]

tiempo de mezclado de unos pocos segundos para asegurar la envuelta del árido por el ligante.

De la Tabla 2, se observa que el coste de producción de las mezclas a baja temperatura es del mismo orden que el de las mezclas en caliente. Incluso en el caso de *Evotherm* se constata un ahorro de aproximadamente 1,6 €/t de mezcla.

Considerando que se ha partido de costes elevados de las tecnologías, que como es habitual disminuirían tras su generalización.

Pero para realizar un análisis completo, a estos costes derivados puramente de la producción, habrían de sumársele otros como los ambientales y los sociales, e incluso otros económicos, pero considerados desde un punto de vista global. Para ello existen hoy en día herramientas basadas en los llamados “análisis de ciclo de vida”. De manera muy simplificada, se podría decir que estos análisis consisten en calcular la huella de carbono (CO<sub>2</sub>) generada en todas las fases implicadas en la fabricación de una mezcla bituminosa, incluyendo algunas como la obtención de las materias primas (también los aditivos, en su caso), los transportes in-

termedios e incluso los trabajos de reparación a lo largo de su vida útil [18]. Algunas metodologías incrementan estos análisis con datos de consumos energéticos y de otras emisiones nocivas para el medio ambiente, y los cuantifican económicamente, obteniéndose una comparación más exacta que la basada simplemente en la producción.

Las Figuras 7 y 8 resumen los resultados medios de varios análisis de ciclo de vida realizados en EEUU a mezclas similares a las analizadas en la Tabla 2. En la primera se indica en porcentaje el peso que las principales operaciones incluidas en la ejecución de un firme tienen sobre aspectos medioambientales tales como el calentamiento global, el consumo de combustible, las emisiones contaminantes y la formación de humos (gases con partículas en suspensión) en el caso de una mezcla en caliente convencional. En la Figura 8, tomando como referencia los aspectos anteriores sobre la ejecución completa de las mezclas en caliente, se compara su magnitud en el caso de empleo de mezclas de baja temperatura, observándose mejoras de hasta el 24%. Estas mejoras estarán recogidas fundamentalmente en las operaciones de fabricación y extendido, ya que la obtención de las materias primas será muy similar, a pesar del uso de aditivos en algunas tecnologías, que en su mayoría son de origen orgánico o mineral.

En el caso de los químicos, el perjuicio que puedan causar al medioambiente es relativamente pequeño debido a su baja dosificación en la mezcla [17].

Estas mejoras medioambientales se pueden cuantificar en base a criterios que dependen del país y del analista, entre otros. Como ejemplo, la emisión de monóxido de carbono (CO) alcanza costes de entre 18 y 145 €/t dependiendo si se trata de una zona rural o urbana [16], y la de metano (CH<sub>4</sub>) ronda los 6.000 €/t. De un modo u otro, queda de manifiesto que el coste global de las mezclas a baja temperatura es menor que el de las mezclas en caliente, y todo ello sin tener en cuenta otros aspectos como el incremento de salubridad en el ambiente de trabajo de los operarios.

## 5. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado una revisión de las principales tecnologías de fabricación de mezclas bituminosas a baja temperatura. Así, en base a los resultados obtenidos durante su desarrollo, las siguientes conclusiones pueden ser extraídas:

1. La incorporación de las tecnologías de mezclas fabricadas a baja temperatura a las plantas asfálticas tradicionales es un proceso deseable y factible. A costa de una pequeña inversión inicial, los productores podrían obtener numerosos beneficios a corto plazo. Desde un punto de vista medioambiental, disminuirían las emisiones contaminantes y el consumo de combustibles. Desde un punto de vista económico, se reduciría el consumo de energía y se podría extender el período de puesta en obra del firme. Finalmente, disminuirían las afecciones a la salud de los operarios, al trabajar a temperaturas inferiores y en ambientes menos nocivos que en el caso de las mezclas en caliente.
2. Las tecnologías de baja temperatura basadas en la adición de productos químicos son las que implican una menor inversión inicial. A continuación se situarían las que trabajan con aditivos orgánicos y con métodos de espumación no mecánica. Los sistemas de espumación mecánica son los que tienen mayores costos. Además, necesitan en cada caso particular un estudio específico adaptado a la planta en la que se vayan a ubicar. No obstante presentan otras ventajas, como la de posibilitar el incremento del material de fresado admisible.
3. Las operaciones de fabricación y extendido de mezclas a baja temperatura siguen básicamente las mismas pautas que en el caso de las mezclas en caliente. Apenas se han de modificar los procesos habituales, por lo que la implantación de estas tecnologías no implica ninguna dificultad para los operarios. Algunos organismos nacionales e internacionales están tratando de precisar estos procedimientos para obtener mezclas de mejor calidad, pero sólo se aprecia la necesidad de pequeños ajustes.
4. Teniendo en cuenta el coste de fabricación y extendido de las mezclas, aquéllas de baja temperatura fabricadas con aditivos químicos resultan tener un precio sustancialmente menor (3,5%) que las equivalentes en caliente. Las fabricadas con aditivos orgánicos tienen un coste similar y las espumadas algo superior (2%), pero un análisis más global de las mismas vuelve a poner de manifiesto su idoneidad.
5. En el análisis del ciclo de vida de las mezclas fabricadas a baja temperatura, que tiene en cuenta las emisiones y consumos generados desde que se obtienen sus materias primas hasta que se agotan definitivamente, todas las tecnologías demuestran su bondad respecto a las mezclas en caliente. Si se cuantifica y valora el descenso de los perjuicios ambientales resultan ser inequívocamente más económicas. A estos aspectos habría que añadirles también el social, ya que la salubridad de los trabajadores incrementa sustancialmente.
6. Existe un gran interés a nivel internacional por la generalización del uso de tecnologías de fabricación

de mezclas bituminosas a baja temperatura. Así, una mayor presencia de las mismas en España contribuiría a incrementar la competitividad de las empresas nacionales del sector en el exterior.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer las recomendaciones de los revisores, que han contribuido en gran medida a la mejora de este trabajo.

## 7.- BIBLIOGRAFÍA

- [1] Acott M, Chambers D.; Cook M, et al. *Warm mix asphalt: contractor's experiences*. 1ª edición. Maryland: Napa, 2008. 24 p. IS:134.
- [2] Carter A, Mainardis O, Perraton D. "Design of half-warm mixes with additives". En: *Transportation Research Board Annual Meeting. 89th edition*. Washington, 2010. Paper 10-1756. 12 p.
- [3] D'Angelo J, Harm E, Bartoszek J, et al. *Warm-mix asphalt: European practice*. Washington: FHWA, February 2008. Report nº FHWA-pl-08-007. 78 p.
- [4] Jenks C, Jencks C, Harrigan E, et al. *Special mixture design considerations and methods for warm mix asphalt: a supplement to NCHRP Report 673: a manual for design of hot mix asphalt with commentary*. Washington: Transportation Research Board, 2011. NCHRP Report 714. 44 p.
- [5] *The use of warm mix asphalt*. [Brussels]: European Asphalt Pavement Association, 2010. 13 p.
- [6] Sierra M, Salas M, Borrego M, et al. *Recomendaciones para la redacción de pliegos de especificaciones técnicas para el uso de mezclas bituminosas a bajas temperaturas*. Andalucía: Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía, 2012. 118 p.
- [7] Gandhi T. "Effects of warm mix asphalt additives on asphalt binder and mixture properties". Doctor dissertation thesis. Clemson University, Mai 2008. 161 p.
- [8] Hurley G, Prowell B. "Evaluation of potential processes for use in warm asphalt mixes". *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*. 2006. Vol. 75. P. 41-85.
- [9] Goh Wei S, Zhanping Y, Thomas J. "Laboratory evaluation and pavement design for warm mix asphalt". En: *Mid-continent Transportation Research Symposium*. 6th edition. Iowa, August 2007. 11 p.
- [10] Jenks C, Jencks C, Harrigan E, et al. *Mix design practices for warm mix asphalt*. Washington: Transportation Research Board, 2011. NCHRP Report 691. 101 p.
- [11] Prowell B, Hurley G, Frank B. *Warm mix asphalt: best practices*. 1ª edición. Maryland: Napa, 2007. Quality Improvement Publication 125. 44 p.
- [12] Zaumanis M. "Warm-mix asphalt investigation". Master of Science Thesis. Riga Technical University, 2011. 111 p.
- [13] *Un proyecto europeo indaga en nuevos asfaltos para adaptar las carreteras al cambio climático*. DiCYT. Dyna Ingeniería e Industria. 2010. Vol. 85. P.633.
- [14] Tomás R. "Sistemas de fabricación de mezclas semicalientes y templadas". En: *IV Jornada Nacional Asefma*. Madrid, 2009. Ponencia 1. 11 p.
- [15] Cegarra R. "Planta multifunción FAMAT 250. Mezclas asfálticas a baja temperatura". En: *V Jornada Nacional Asefma*. Madrid, 2010. Comunicación 33. 7 p.
- [16] Leng Z, Al-Qadi I. *Comparative life cycle assessment between warm SMA and conventional SMA*. Illinois: Illinois Center of Transportation, 2011. Research Report ICT-11-090. 19 p.
- [17] Hassan M. "Life-cycle assessment of warm mix asphalt: an environmental and economic perspective". En: *Transportation Research Board Annual Meeting*. 88th edition. Washington D.C., 2009. Paper 09-0506. 17 p.
- [18] Kristjánsdóttir O, Muench S, Michael L, et al. "Assessing potential for warm-mix asphalt technology adoption". *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2007. Nº 2040 p. 91-99.