



# Investigación de Nuevas Mezclas de Baja Energía para la Rehabilitación Superficial (INMBERS)





# Investigación de Nuevas Mezclas de Baja Energía para la Rehabilitación Superficial (INMBERS)

## Actividad 1.1. Estado del Arte

### ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	7
1.1	Historia	9
2	PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO	10
2.1	Procesos de espumación	12
2.1.1	Método indirecto	13
2.1.2	Método directo	13
2.2	Aditivos orgánicos	15
2.3	Aditivos químicos	16
3	ANÁLISIS DE LOS DISTINTOS PRODUCTOS COMERCIALES	17
3.1	Procesos de espumación	19
3.1.1	Aspha-Min®	19
3.1.2	Advera®	20
3.1.3	Double Barrel Green® System	21
3.1.4	UltraFoam GX	22
3.1.5	LT Asphalt	23
3.1.6	WAM Foam	23
3.1.7	Low Energy Asphalt	25
3.1.8	Low Emission Asphalt	25
3.1.9	LEAB	26
3.2	ADITIVOS ORGÁNICOS	27
3.2.1	Sasobit	27
3.2.2	Asphaltan B	28
3.2.3	Licomont BS	28
3.2.4	3E LT y 3E BD	29
3.3	ADITIVOS QUÍMICOS	29
3.3.1	Evotherm	29
3.3.2	Cecabase RT	31
3.3.3	Rediset WMX	31
3.3.4	Iterlow T	33
4	LA ZEOLITA	34
4.1	Definición, composición y estructura	34

4.2	Propiedades	36
4.2.1	Intercambio iónico y selectividad	36
4.2.2	Difusividad aparente	36
4.2.3	Capacidad de intercambio iónico	37
4.2.4	Modificación de las propiedades superficiales de las zeolitas	37
4.3	Aplicación a las mezclas semicalientes: Aspha-Min y Advera	37
5	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	39
5.1	Betún	39
5.1.1	Viscosidad	40
5.1.2	Punto de rotura de Fraas	40
5.1.3	Durabilidad y resistencia al endurecimiento	40
5.1.4	Penetración conservada y punto de ablandamiento	41
5.2	Diseño de la mezcla	42
5.2.2	Aditivos	43
5.2.3	Ensayos de Laboratorio	43
5.2.4	Temperaturas de producción y compactación	44
5.2.5	Selección del betún	45
5.2.6	Contenido de betún	45
5.3	Modificación de la planta	46
5.3.1	Tecnologías basadas en la adición de productos	46
5.3.2	Equipos especiales para los procesos de espumación	47
5.3.3	Equipos para la dosificación de aditivos	47
5.3.4	Mezclado	48
6	PROPIEDADES, RENDIMIENTO Y COSTES COMPARATIVOS	48
6.1	Rendimiento	48
6.2	Propiedades	49
6.2.1	Compactabilidad	49
6.2.2	Curado	51
6.2.3	Sensibilidad a la humedad	52
6.2.4	Rigidez de la mezcla	53
6.2.5	Deformaciones permanentes	54
6.2.6	Comportamiento a bajas temperaturas	56
6.3	Costes comparativos	56
7	BENEFICIOS, DESVENTAJAS y POSIBLES CAMPOS DE ESPECIALIZACIÓN DE LAS MEZCLAS SEMICALIENTES	60
7.1	Beneficios potenciales de las mezclas semicalientes	60
7.1.1	Beneficios ambientales y de emisiones	60
7.1.2	Beneficios económicos	62
7.1.3	Beneficios de producción	63
7.1.4	Beneficios de pavimentación	64

7.2	Inconvenientes	65
7.2.1	Deformaciones permanentes (rutting)	65
7.2.2	Costes económicos	66
7.2.3	Sensibilidad a la humedad/agua	66
7.2.4	Rendimiento a largo plazo	67
8	Posibles especializaciones	67
9	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	68
10	BIBLIOGRAFÍA	70
	WEBGRAFÍA	73

## ÍNDICE de FIGURAS

Figura 1 - Ilustración del concepto de desarrollo sostenible. Fuente: D'Angelo et al [16]	8
Figura 2 - Gráfico que esquematiza una posible clasificación de las mezclas semicalientes. Fuente: D'Angelo et al [5]	11
Figura 3 - Esquema de las distintas tecnologías semicalientes. Fuente: elaboración propia	12
Figura 4 - Aspha-Min en forma de polvo. Fuente: asphamin.com	19
Figura 5 - Imagen de Advera en polvo. Fuente: adverawma.com	20
Figura 6 - Esquema de la maquina patentada de Double Barrel. Fuente: doublebarrel.com	21
Figura 7 - Maquinaria para la tecnología UltraFoam GX. Fuente: Gencor.com	22
Figura 8 - Esquema para la introducción de agua en el mecanismo LT Asphalt. Fuente: Nynas.com	23
Figura 9 - Diferencia entre el mecanismo convencional de fabricación y WAM Foam. Fuente: wamfoam.com	24
Figura 10 - Fases por las que pasa el árido en el proceso Low Energy Asphalt y Low Emission Asphalt. Fuente: McConnaughay.com	26
Figura 11 - Sasobit en forma de polvo y granular. Fuente: D'Angelo et al. [16]	27
Figura 12 - Gráfico que presenta la similitud las mezclas convencionales y las WMA realizadas con CecaBase. Fuente: Ceca.com	32
Figura 13 - Rediset y su forma granular/ pastilla. Fuente: RedisetWMX.com	33
Figura 14 - Gráfico de la estructura interna de la zeolita. Fuente: wikipedia.org	34
Figura 15 - Imagen a microscopio electrónico de la estructura interna de la zeolita. Fuente: google.com	35
Figura 16 - Imagen que permite entender cómo seleccionar la temperatura de fabricación de las mezclas semicalientes.	44
Figura 17 - Aumento de la densidad conforme al número de pasadas del compactador. Fuente: Zaumanis[1]	50
Figura 18 - Diferencia de humos entre una mezclas convencional y otra semicaliente. Fuente: warmmixasphalt.ogr	62
Figura 19 - Mapa de los EE.UU. con las zonas con emisiones restringidas de ozono. Fuente: google.com	64

## ÍNDICE de TABLAS

<i>Tabla 1 - Características de la zeolita. Fuente: norma alemana [15].....</i>	<i>13</i>
<i>Tabla 2 - Distintos tipos de ceras usado en las mezclas semicalientes y características. Fuente: norma alemana [15].....</i>	<i>16</i>
<i>Tabla 3 - Productos comerciales para la fabricación de mezclas semicalientes. Fuente: elaboración propia.....</i>	<i>19</i>
<i>Tabla 4 - Costes de producción de mezclas convencionales y ahorros para las WMA según localizaciones. Fuente: 6,20.....</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 5 - Costes de varias tecnologías WMA. Fuente:6,20.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 6 - Tabla en la que se recogen valores de emisiones para distintas investigaciones. Fuente: elaboración propia .....</i>	<i>61</i>

## 1 INTRODUCCIÓN

La industria de las mezclas asfálticas trata constantemente de encontrar mejoras tecnológicas que, en cierta manera, mejoren el rendimiento de los materiales, aumenten la eficiencia constructiva, conserven y respeten los recursos a utilizar y la hagan estar a la vanguardia del avance medioambiental [1]. La producción y extendido de las mezclas asfálticas ha evolucionado durante los últimos 130 años, pasando de la mezcla y extensión a mano con palas, a las plantas de alimentación informatizadas, con equipos de compactación, mezclas y extendido altamente automatizados. Durante este periodo, ha sido ampliamente aceptado el hecho de que el control de la temperatura es crucial para la envuelta del árido, la estabilidad de la matriz durante la producción y el transporte, facilidad de extendido, y en última instancia para el rendimiento del asfalto. Durante el extendido de las mezclas, la temperatura debe ser lo suficientemente alta como para asegurar la trabajabilidad de las mezclas, pero al mismo tiempo debe de estar por debajo del límite que provoque excesivo envejecimiento del ligante [2].

Resulta por lo tanto lógico que uno de los caminos de investigación que se han llevado a cabo con objeto de conseguir las metas anteriormente mencionadas trate sobre la reducción de las temperaturas de producción de los materiales, una de las tareas en la producción de asfaltos donde el consumo energético y el daño ambiental son mayores [3,4]. Durante los últimos 15 años, se ha introducido, como resultado de estas investigaciones, el concepto de mezclas semicalientes, en inglés denominadas Warm Mix Asphalt (WMA). Se entiende por mezclas semicalientes aquellas que se producen a temperaturas menores que las calientes convencionales, en un rango que varía entre 20 y 55°C menos [1].

Los mismos mecanismos que permiten a las tecnologías WMA mejorar la trabajabilidad a menores temperaturas también les permiten actuar como agentes de compactación. La compactación mejorada o las densidades conseguidas in situ tienden a reducir la permeabilidad y el envejecimiento del betún, lo que en general se traduce en una mejora del rendimiento de las mezclas en términos de resistencia a la fisura y sensibilidad a la humedad [5]. Las tecnologías WMA también tienen el potencial de ser beneficiosas para la pavimentación en tiempos fríos o cuando hay que transportar las mezclas a grandes distancias antes de ser extendidas. La menor diferencia de temperatura entre las temperaturas de mezclado y ambiente da lugar a ratios menores de enfriamiento. Dado pues que las mezclas semicalientes pueden ser compactadas a menores temperaturas, se dispone de más tiempo para llevar a cabo la compactación [6].

A pesar de las ventajas anteriormente mencionadas, existen aún algunas dudas o problemas con vistas a la implantación de estas mezclas. Así, el rendimiento a largo plazo de estas mezclas es desconocido, dado que los ensayos de campo no cuentan con más de 10 años de antigüedad, lo que en un primer momento puede echar para atrás tanto a las autoridades como a las empresas del mundo del asfalto [7]. Además, la necesidad de equipos especiales, materiales concretos y aprendizaje por parte de los trabajadores suponen más complicaciones para estas mezclas. En ciertos productos, algunos problemas con la humedad, debido al indebido secado de los áridos, se han detectado [8].

Para el mejor entendimiento del impacto que estas mezclas pueden tener, sería bueno recordar el concepto de desarrollo sostenible, ampliamente aplicado y desarrollado actualmente. Según la Comisión de las Naciones Unidas, se entiende por desarrollo sostenible “aquel desarrollo que permite satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la habilidad de las sociedades futuras de satisfacer sus propias necesidades”. Por lo tanto, a partir de la anterior definición queda claro que el desarrollo sostenible no se centra solo en lo que a impacto ambiental se refiere, sino que aúna tres áreas independientes: desarrollo económico, desarrollo social y protección ambiental, como podemos observar en la Figura 1. Las mezclas semicalientes son consistentes con los ideales descritos por el desarrollo sostenible [5].

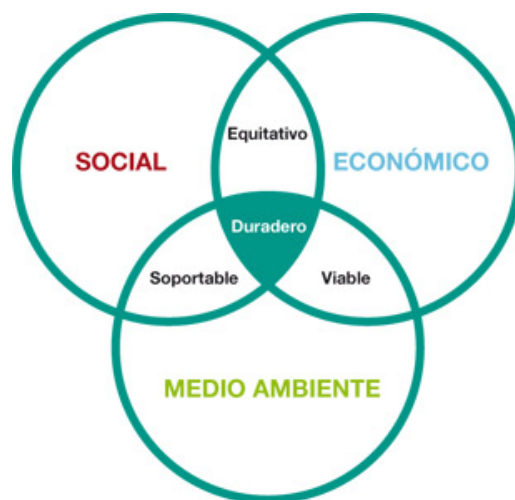


Figura 1 - Ilustración del concepto de desarrollo sostenible. Fuente: D'Angelo et al [16]



El objetivo de este documento es analizar el estado actual en el que se encuentran estas tecnologías. Para ello, se hará un breve repaso de sus orígenes y pasos que ha seguido a lo largo de su historia. A continuación, se presentará cada uno de los métodos que existen para la fabricación de este tipo de mezclas, prestando especial atención a los principios de funcionamiento en los que se basan. Una vez introducidas las mezclas, se analizarán tanto su rendimiento a largo plazo, como las ventajas e inconvenientes expresadas por los diversos autores consultados. Dado que el proyecto se encuentra enmarcado en el uso de la Zeolita Cubana, se prestará especial atención a las marcas comerciales Aspha-min® y Advera, debido a que el principio de las zeolitas sintéticas es muy similar. Además, se hará un breve comentario acerca de las modificaciones que puede sufrir el proceso de fabricación con respecto a las mezclas convencionales, así como recomendaciones y líneas de investigación posibles.

## 1.1 Historia

La idea de conseguir una reducción de temperatura a la hora de producir mezclas asfálticas no es nueva. Durante décadas, temas como ahorrar energía y reducir emisiones han sido discutidos, tratados e investigados ampliamente.

En 1956, el profesor Ladis H. Csanyi, doctor en Iowa State University, investigó acerca del potencial del betún espumado para uso como ligante de suelos. Desde entonces, la tecnología de asfaltos espumados, que permite reducir las temperaturas de mezclado, ha sido usada con éxito en diferentes países. El proceso original consistía en inyectar vapor de agua al betún caliente. En 1968, Mobil Oil Australia, que había adquirido los derechos de la investigación de Csanyi, modificó el proceso original añadiendo agua fría en lugar de vapor al betún caliente. De este modo, el proceso de espumación del betún se convirtió en algo más práctico y aplicable [9].

En 1994, Maccarone experimentó desarrollos en mezclas frías basados en el uso de betún espumado y emulsiones de alto contenido de ligante. En aquel momento, el autor afirmaba que el uso de mezclas fría aplicadas a los trabajos de carreteras estaba ganando amplia aceptación. Tales sistemas son eficientes a nivel energético y menos dañinos para el medio ambiente, al no emitir hidrocarbonatos y usar menos combustible en su fabricación [7]. A pesar de poseer muchas ventajas y cualidades, las mezclas frías no han afectado a la posición de las mezclas calientes como material dominante de pavimentación, ya que no consiguen o desarrollan un rendimiento a largo plazo equiparable a dichas mezclas calientes.

En 1999, Jenkins et al. [10] introdujeron un nuevo proceso, el tratamiento de betún espumado templado. Sus documentos y estudios exploraron las consideraciones y posibles beneficios de calentar una amplia gama de áridos a temperaturas superiores a la ambiente, pero por debajo de los 100°C, antes de introducir el betún espumado en la mezcla. Los resultados de esta investigación mostraban una buena envuelta de las partículas de árido, así como una gran cohesión de las mezclas, un índice de tracción correcto y una

compactación adecuada [10]. Habían nacido así las mezclas semicalientes, tal y como las conocemos actualmente.

Para el año 2000, la expansión acerca del conocimiento de estas mezclas empieza a hacerse patente. Así pues, empiezan a producirse presentaciones y conferencias alrededor del mundo. Éste es el caso de Harrison y Christodoulaki en la First International Conference of Asphalt Pavements (FICAP) en Sydney, Australia [6]. Este mismo año, aparece un documento del autor Koenders y su equipo. En éste evaluaban el rendimiento de las mezclas semicalientes (WMA) mediante el ensayo de mezclas en laboratorio y en campo (en Noruega, Reino Unido y Holanda) con referencia particular a la producción de mezclas densas en capas de rodadura [11]. De la mano de este mismo investigador aparece en 2002 un nuevo método de mezclas semicalientes, conocido bajo el nombre de WAMFoam, que produce mezclas asfálticas a menores temperaturas.

En 2004, Barthel, Von Devivere et al [3] hacen uso de zeolitas sintéticas, recogidas bajo el nombre comercial Aspha-Min®, como aditivo en las mezclas bituminosas de cara a mejorar la trabajabilidad de las mismas a temperaturas más bajas. Como se comprueba a partir de lo anterior, el desarrollo de los inicios de esta tecnología se produce principalmente en Europa y Australia, no siendo hasta Junio de 2005 cuando aparecen los primeros documentos en EE.UU. de la mano del National Center for Asphalt Technology (NCAT), que publicó dos artículos acerca de investigaciones realizadas con dos productos pertenecientes a la gama de las WMA: Sasobit® y Aspha-Min® [8,12].

## 2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

A partir del estudio de todas las tecnologías que actualmente se encuentran en uso, diversas clasificaciones pueden realizarse para intentar agrupar los distintos productos que se comercializan. De este modo, aunque el objetivo de todas estas tecnologías sea el mismo (reducir la temperatura de producción y extendido), en este apartado vamos a tratar principalmente con dos clasificaciones.

La primera de estas clasificaciones se basa en los diferentes rangos de reducción de temperatura que se consiguen. Directamente relacionados con estos rangos de reducción se puede hallar el consumo de combustible por tonelada. Así pues, recogiendo la amplia gama de mezclas que pueden producirse, la clasificación tendría la forma siguiente [4,13,14]:

- Mezclas frías (Cold Mixes): se trata de aquellas mezclas asfálticas producidas a temperatura ambiente (hasta los 40°C), y que para conseguir la trabajabilidad adecuada utilizan bien emulsiones, bien betún espumado.
- Mezclas templadas (Half-Warm Mix Asphalt): este tipo de mezclas se caracteriza porque su temperatura de producción no supera en ningún

momento la temperatura de ebullición del agua ( $100^{\circ}\text{C}$ ), usando para ello en la mayoría de los casos la humedad de los áridos.

- Mezclas semicalientes (Warm Mix Asphalt): se mueven en un rango de producción que varía desde temperaturas poco superiores a los  $100^{\circ}\text{C}$ , hasta cerca de los  $150^{\circ}\text{C}$ . Será este tipo de mezclas en las que nos centremos, y las diferentes tecnologías que se utilizan para conseguir esta reducción serán comentadas posteriormente.
- Mezclas calientes (Hot Mix Asphalt): las más extendidas por tradición, son todas aquellas cuya temperatura de producción supera los  $160^{\circ}\text{C}$ . Como se ha comentado anteriormente, son necesarias estas elevadas temperaturas de modo que se consiga la manejabilidad adecuada de las mezclas, así como la mejor envuelta de los áridos.

En el gráfico que se incorpora a continuación es posible visualizar los rangos anteriormente mencionados, con su correspondiente gasto de combustible (aproximado) por tonelada de producción [5].

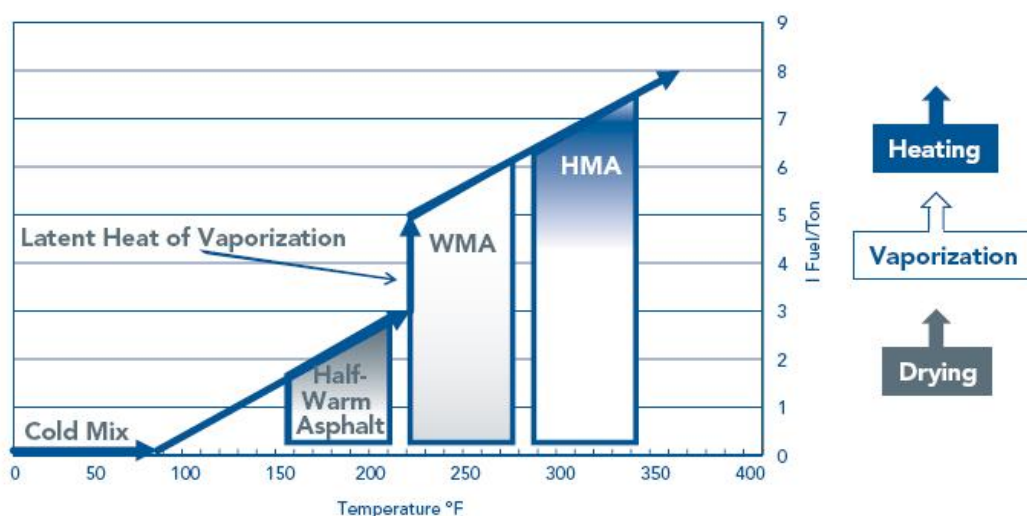
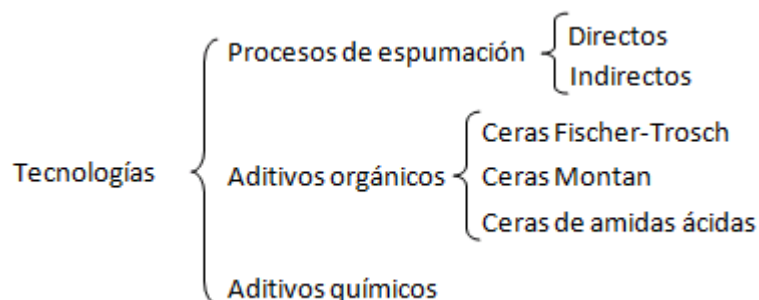


Figura 2 - Gráfico que esquematiza una posible clasificación de las mezclas semicalientes. Fuente: D'Angelo et al [5]

Aunque la anterior clasificación puede ser válida para explicar las características generales de las mezclas, el objetivo de este documento es el análisis de los distintos tipos de tecnologías existentes de las mezclas semicalientes. A pesar de que en un principio cada uno de los productos tiene sus características particulares, diferentes rasgos comunes pueden ser identificados entre algunos de ellos, los que nos permite establecer una clasificación más detallada en función del principio de funcionamiento en el que se basan [1,4,5,13,15,16]. Dicha clasificación tiene la siguiente estructura:



**Figura 3 - Esquema de las distintas tecnologías semicalientes. Fuente: elaboración propia**

A continuación se va a explicar con mayor detenimiento el principio de funcionamiento en el que se basan cada una de las tecnologías que se pueden ver en la clasificación anterior, para en el punto 3 tratar con mayor énfasis cada uno de los productos comerciales existentes, enmarcándolos dentro de alguno de los grupos establecidos en este apartado.

## 2.1 Procesos de espumación

El principio de funcionamiento de este tipo de tecnología WMA se basa a grosso modo en el uso de pequeñas cantidades de agua, ya sea bien inyectadas directamente en el betún caliente o bien añadidas con los áridos al tambor de mezclado [1]. Cuando el agua se mezcla o entra en contacto con el betún caliente, las altas temperaturas de éste provocan su evaporación, y el vapor queda atrapado dentro de la matriz del betún. De este modo, se genera un volumen considerable de vapor, que se encarga de incrementar de manera temporal el volumen del betún y disminuye la viscosidad del mismo [15]. Este efecto dota a la mezcla de una mejora notable en lo que a envoltura y trabajabilidad de la mezcla se refiere. Una característica común a los distintos procesos de espumación es lo limitado del efecto, de modo que el extendido y compactado de este tipo de mezclas debería ser llevado a cabo poco después de su producción [17]. Estos métodos se han usado con betunes de muy diferentes penetraciones, obteniéndose diversos resultados. Precauciones especiales tienen que tomarse para que la cantidad adicionada de agua sea la correcta, es decir, se debe añadir suficiente agua para asegurar el efecto de espumación, pero no demasiada de modo que se evite problemas de cohesión que se pudieran crear por la incorrecta evaporación de toda el agua [18].

Aunque el proceso principal es el mismo para un gran número de productos que usan este principio, el modo en el que el agua es añadida a la mezcla puede variar. Así pues, es

posible distinguir entre dos tipos diferentes: basadas en agua o método directo y continentes de agua o método directo [1,4].

### 2.1.1 Método indirecto

Este grupo se basa en el uso de zeolitas sintéticas para conseguir el proceso de espumación. Este material está compuesto de aluminosilicatos de metales alcalinos, y ha sido hidrotérmicamente cristalizado. Contienen aproximadamente un 20% de agua de cristalización, la cual se libera de la estructura de la zeolita ante el aumento de temperatura provocado por la adición del betún, causando un efecto de micro-espumación en la mezcla asfáltica [8,15,19,20,53]. La estructura de las zeolitas está formada por vacantes relativamente grandes respecto su tamaño, donde cationes e incluso moléculas o grupos de moléculas (en este caso agua) pueden ser almacenados. La habilidad de este material de poder absorber y perder agua sin dañar su estructura cristalina es una las principales características de estos silicatos [20,21]. A modo de resumen, se presenta abajo una tabla con las características principales de este material, extraída de la bibliografía [15].

Nombre	Zeolita
<b>Apariencia</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Las zeolitas que se usan son de tipo A, que se venden en forma de un polvo blanco y polvo con tinte amarillento.</li> <li>- La distribución del tamaño de las partículas y la densidad se usan como valores característicos.</li> <li>- Su distribución de tamaños de partículas provee información acerca de cómo manejarlas y usarlas en el proceso.</li> <li>- La densidad da información acerca de la porosidad del material</li> </ul>
<b>Estructura</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Son silicatos de estructura tridimensional, altamente porosas, con grandes huecos o canales.</li> <li>- Su tamaño de poros va desde las 2 a las 5 Å (<math>1\text{Å}=10^{-10}\text{ m}</math>).</li> <li>- Las zeolitas conservan su forma y tamaño.</li> </ul>
<b>Propiedades/ efecto</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Las zeolitas pueden absorber partículas ajenas dentro de su estructura y posteriormente liberarlas sin cambiar su forma.</li> <li>- No reaccionan a través de su superficie exterior porque todos los centros activos están situados dentro de los poros y los huecos.</li> <li>- Las zeolitas naturales y sintéticas contienen de 6 a 12% y 25% de agua, respectivamente.</li> <li>- Esta agua se libera selectivamente en temperaturas que van desde los 70 hasta los 220°C</li> </ul>

**Tabla 1 - Características de la zeolita. Fuente: norma alemana [15]**

### 2.1.2 Método directo

Este apartado agrupa a aquellos productos que usan agua de un modo directo. Es decir, el agua que se necesita para crear el efecto de espumación es inyectada directamente al flujo de betún caliente, realizándose en la mayoría de los casos a través de boquillas. El agua añadida rápidamente se evapora, produciendo un largo volumen de vapor, el cual lentamente va desapareciendo [5]. Dentro de este grupo, se puede realizar una distinción aún mayor como sigue (basada en los productos comerciales):

- Double Barrel Green, Ultrafoam GX, LT Asphalt: Aunque los equipos usados para introducir dentro del asfalto caliente el agua difiere unos productos de otros (cada producto está patentado por una compañía, que posee sus propios equipos), el principio básico es el mismo. Usan numerosas boquillas para introducir agua fría, de modo que se consiga la micro-espumación del ligante [1].
- WAM Foam: Es un sistema basado en dos componentes de ligante (también conocido como método de las dos fases) que introduce un ligante más blando al principio y posteriormente uno duro espumado dentro del ciclo de producción de la mezcla. Al betún duro se le inyecta agua fría en pequeñas cantidades para inducir el proceso de espumación y aumentar la capacidad de envolver del mismo. Esta combinación de betún blando y otro más duro espumado actúa para bajar la viscosidad de la masa de la mezclas para dotarla de la trabajabilidad necesaria [1,6,19,20,54].

Hay además otras tecnologías que también usan el agua, pero a las que no queda claro en cuál de los dos grupos anteriores clasificar. Un caso así es el del Low Energy Asphalt – LEA (Asfalto de baja energía). La principal característica de este tipo de proceso es el uso de áridos finos (arena) en estado húmedo. La idea consiste en hacer un secado parcial de algunos tamaños de árido, de modo que se tenga un efecto de espumación al tener contacto éstos con el ligante caliente. Este procedimiento se conoce como mezclado secuencial. El contenido final de agua es de alrededor del 0.5 % a los 95°C, para así asegurar la trabajabilidad y la compactación suficientes [5,14,55].

Un desarrollo más actualizado a partir del Low Energy Asphalt es el Low Emission Asphalt (Asfalto de baja emisión). El proceso también usa el mezclado secuencial, pero en éste al ligante se le añade un aditivo químico antes de mezclarlo con los áridos gruesos, y a continuación se introduce la arena húmeda, con lo que se crea el efecto de espumación [55].

## 2.2 Aditivos orgánicos

Estas tecnologías se basan en la adición a la mezcla de distintos tipos de cera. Por encima del punto de fusión de las ceras, se produce generalmente un decrecimiento en la viscosidad [1]. Durante el periodo de enfriamiento de la mezcla extendida los aditivos fundidos solidifican en partículas microscópicas y uniformemente distribuidas que incrementan la dureza del ligante, análogo a los materiales reforzados con fibras [17]. Es necesario seleccionar cuidadosamente el tipo de cera a utilizar, de manera que se eviten posibles problemas con las temperaturas. Es decir, si el punto de fusión de las ceras es más bajo que las temperaturas que se preveen en servicio del asfalto, pueden aparecer complicaciones, convirtiéndose entonces el asfalto en un material frágil a bajas temperaturas [4,15]. Por lo tanto hay que intentar que se encuentren en estado sólido a temperaturas de servicio.

Las ceras usadas por estos productos son moléculas formadas por cadenas hidrocarbonadas que se funden a temperaturas entre los 80 y los 120°C, modificando por lo consiguiente las propiedades originales del ligante. El punto de fusión depende en gran medida de la longitud de la cadena de carbonos (C45 o más) [14]. Entre un 2 y un 4% de cera del total de la masa del ligante es la dosificación habitual. Los aditivos orgánicos suelen conseguir una reducción de temperatura de entre 20-30°C, mientras que también mejoran la resistencia a deformación de los asfaltos tratados con estos productos [4]. Este tipo de procesos se han desarrollado desde el final de los años 80, existiendo actualmente tres tipos diferentes de tecnologías que se basan en este proceso. La única diferencia entre ellas es el tipo de cera utilizado para conseguir la reducción de la viscosidad. Las ceras son: Fischer-Tropsch, ámidas ácidas fatty y ceras de Montana. A partir de la referencia bibliográfica [15], un cuadro resumen se presenta a continuación.

		Sustancia		
Nombre		Ceras Fischer-Tropsch	Ámidas ácidas grasas	Ceras de Montana
Apariencia		Polvo blanco o gránulos	Polvo blanco o gránulos	Polvo marrón o gránulos
Estructura		Larga cadenas de hidrocarbonados alifáticos	Diamidas ácidas grasas	Éster ácido montánico
Propiedades	Punto de fusión [°C]	114-120	140-145	10-140
	Punto de congelación	100-105	135-142	100-130

	[°C]				
	Viscosidad dinámica en MPa a	130°C	11-15	No medible	20-200
		140°C	9-13	13-17	No determinado
		150°C	8-12	9-13	5-15
Efecto en betún de carretera 50/70	Aditivo (% de peso)		3.0*	3.0*	2.5-3.0*
	Incremento del punto de ablandamiento R&B (°C)		25-35	40-55	Información del productos
	Decrecimiento de la penetración (1/10 mm)		15-25	10-15	Información del productor
			*) Porcentaje por peso de ligante		

**Tabla 2 - Distintos tipos de ceras usado en las mezclas semicalientes y características. Fuente: norma alemana [15]**

### 2.3 Aditivos químicos

El último tipo de tecnologías WMA que se va a considerar son los aditivos químicos. Estos productos no dependen de ningún proceso de espumación o de reducción de la viscosidad para reducir las temperaturas de mezclado y compactación [4,20]. En lugar de eso, estos productos generalmente incluyen una combinación de agente emulsificantes, surfactantes, polímeros y aditivos para mejorar la envuelta, la trabajabilidad de la mezcla, y la compactación, así como promotores de adhesión (agentes cohesivos). La cantidad añadida y la reducción de temperatura conseguida por estas tecnologías dependen del producto específico utilizado. Los aditivos generalmente se mezclan con el ligante antes de que éste sea introducido en el tambor de mezclado.

Su uso se ha extendido sobretodo en USA, pero también en países europeos como Francia y Noruega. La reducción de temperatura se mueve en rangos que van desde los 15-30°C conseguidos por REVIX® a los 50-75°C supuestos para Evotherm ET [22]. Estos productos son los más nuevos en el campo de las mezclas semicalientes, de ahí que las investigaciones y los resultados que se han publicado sean bastante más escasos que para los otros tipos. Sin embargo, los resultados prometedores que hasta ahora se han obtenido permiten pensar en ellos como una fuerte alternativa.



### 3 ANÁLISIS DE LOS DISTINTOS PRODUCTOS COMERCIALES

Como se ha visto en el apartado anterior, son numerosos los productos que se han desarrollado durante los últimos años en el campo que se refiere a las mezclas semicalientes. Está claro que todas estas tecnologías persiguen el mismo objetivo: disminución de la temperatura de fabricación, extendido y compactación de las mezclas asfálticas. Sin embargo, a partir de ideas originales como las que se han visto en el apartado dedicado a la historia de estas muestras, y realizando diversas modificaciones, se han obtenido diversos productos bajo patente que se van a estudiar más profundamente a continuación. La extensión referente a cada uno de ellos depende principalmente de la cantidad de investigación que se ha realizado acerca de cada uno, siendo lo más prominentes los productos Ashpa-Min®, Sasobit®, Evotherm y Wam-Foam®, que han sido ensayados tanto en laboratorio como in situ ampliamente. A modo resumen se adjunta la tabla 3, con la mayoría de los productos que se comercializan hoy en día, con las principales características que les son propias a cada uno.

Proceso WMA	Producto	Empresa	Descripción	Cantidad de aditivo/Dosificación	Usados en	Temperatura de producción (o rango de reducción)
Procesos de espumación						
Método directo	<b>Aspha-Min®</b>	Eurovia and MHI	Proceso de espumación por el método directo	0.3 % del peso total de la mezcla	USA, Alemania, Francia, extendido	(20-30°C)
Método directo	<b>Advera®</b>	PQ Corporation	Proceso de espumación por el método directo	0.25 % del peso total de la mezcla	USA	(10-30°C)
Método indirecto	<b>Double Barrel Green</b>	Astec	Proceso de espumación por el método indirecto	2 % de agua por masa de betún; agentes cohesivos	USA	116-135°C
Método indirecto	<b>Ultrafoam GX</b>	Gencor industries	Proceso de espumación por el método indirecto	1-2 % agua por masa de betún	USA	Not specified
Método indirecto	<b>LT Asphalt</b>	Nynas	Betún espumado hidrofílicamente additive	0.5-1 % por masa de betún	Holanda e Italia	90°C
Método indirecto	<b>WAM-Foam</b>	Shell and Kolo-	Envuelta de betún blando seguido de ligante duro	2-5 % de agua por masa de betún duro	Extendido	100-120°C

Proceso WMA	Producto	Empresa	Descripción	Cantidad de aditivo/Dosificación	Usados en	Temperatura de producción (o rango de reducción)
		Veidekke	espumado			
Método indirecto	<b>Low Energy Asphalt</b>	McConnaugha y Technologies	Árido grueso mezclado con arena húmeda	3 % agua introducida mediante la arena fría	USA, Francia, España, Italia	<100 °C
Método indirecto	<b>Low Emission Asphalt</b>	McConnaugha y Technologies	Árido grueso mezclado con arena húmeda	3 % agua introducida mediante arena fría; 0,4% de peso de betún	USA	90°C
Método indirecto	<b>LEAB</b>	Royal Bam Group	Espumación directa mediante aditivo al ligante. Mezcla de árido por debajo de los 100°C	0.1% de peso de betún de aditivos cohesivos y de envuelta	Holanda	90°C
Aditivos orgánicos						
Cera FT	<b>Sasobit</b>	Sasol	Cera Fischer-Tropsch	Alemania: 2.5% por peso de betún;USA: 1-1.5%	Alemania y otros 20 países	(20-30°C)
Cera de Montana	<b>Asphaltan B</b>	Romonta GmbH	Cera refinada de Montana	2.0-4.0% por masa del betún	Alemania	(20-30°C)
Amidas ácidas grasas	<b>Licomont BS</b>	Clariant	Amidas ácidas grasas	3.0% por masa de betún	Alemania	(20-30°C)
	<b>3E LT or Ecoflex</b>	Colas	Propiedad	No especificado	Francia	(30-40°C)
Aditivos químicos						
Químico	<b>Evotherm Technologies</b>	MeadWestvac o	Paquetes químicos, con o sin agua	0.5% de masa de emulsión bituminosa. La emulsión contiene un 70% de betún	USA, Francia, extendido	85-115°C

Proceso WMA	Producto	Empresa	Descripción	Cantidad de aditivo/Dosificación	Usados en	Temperatura de producción (o rango de reducción)
Químico	<b>Cecabase RT</b>	CECA	Paquete Químico	0.2-0.4% por peso de la mezcla	USA, Francia	(30°C)
Químico	<b>Rediset</b>	Akzo Nobel	Surfactantes catiónicos y aditivos orgánicos	1.5-2% del peso del betún	USA, Noruega	(30°C)
Químico	<b>Revix</b>	Mathy-Ergon	Agentes tensoactivos, ceras, agentes de mezclado, polímeros	No especificado	USA	(15-25°C)
Químico	<b>Iterlow T</b>	IterChimica	----- ---	0.3-0.5% por masa de betún	Italia	120°C

**Tabla 3 - Productos comerciales para la fabricación de mezclas semicalientes.**  
**Fuente: elaboración propia**

### 3.1 Procesos de espumación

#### 3.1.1 Aspha-Min®

Aspha-min® es una zeolita sintética producida por la empresa alemana Eurovia GmbH. Las zeolitas sintéticas son silicatos sódico-alumínicos que han sido hidrotérmicamente cristalizados. Contienen alrededor de un 21% de agua por peso. Se presenta comercialmente como unos gránulos muy finos, con un tamaño medio de partícula de alrededor de 380 µm o bien como un polvo fino, con 3.5 µm de tamaño medio. En el rango de temperaturas que va desde los 85 hasta los 180°C, el agua cristalina que contienen las partículas es liberada, creando el ya conocido efecto de espumación correspondiente, e incrementando la trabajabilidad de la mezcla. Eurovia recomienda añadir Aspha-min® en un ratio del 0.3% por masa de la mezcla, lo que permite conseguir reducciones del orden de los 30°C en la producción y extendido de las mezclas [53].



**Figura 4 - Aspha-Min en forma de polvo. Fuente: asphamin.com**

Cuando se añade Aspha-min® a la mezcla al mismo tiempo que el ligante, el agua que contiene es liberada lo que crea una expansión de volumen del ligante que da lugar a la espumación de la mezcla y permite una mejor envuelta de los áridos y mayor

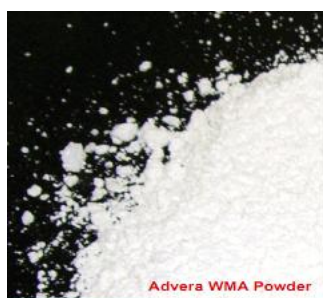
trabajabilidad, todo ello a menores temperaturas de las habituales [8]. Eurovia asegura que todos los betunes conocidos, los modificados con polímeros así como el asfalto reciclado pueden ser usados junto con la implementación de esta tecnología. Además de esto, también todo tipo de áridos y fillers han sido probados para estas mezclas y no se producen, por lo tanto, modificaciones en el normal diseño de la mezcla. La adición de la zeolita en el proceso de mezclado no tiene por qué ser realizada a través de dispositivos especiales, pudiéndose realizar mediante un proceso similar a aquél usado para añadir ciertos tipos de fibras, y no alarga la duración del mismo [3]. En el caso de que deba añadirse al filler, el mezclado a mano también está contemplado [6].

A partir de la consulta de la web del producto, diversas recomendaciones son comentadas. Se aconseja el almacenaje entre -15°C y 70°C, ya que en ese rango no se produce ninguna modificación. Se aconseja evitar la humedad, y no existe ningún peligro de intoxicación por humos. Atendiendo a la legislación vigente (europea), no se considera Aspha-min como un producto peligroso, y por lo tanto no se encuentra etiquetado en este sentido [53]. A partir de estudios llevados a cabo, se ha determinado que la disminución en la temperatura conseguida por Aspha-min® lleva claramente a un marcado menor consumo de energía. Esto último influye además en las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, dando lugar de este modo a una mejora medioambiental [13].

Más de 100 proyectos realizados mediante el uso de esta tecnología desde 1995 avalan la fiabilidad y la consecución de los objetivos deseados.

### 3.1.2 Advera®

Se trata de una zeolita sintética, al igual que Aspha-Min®, que consigue la producción y extendido de mezclas a temperaturas semicalientes de entre 20 a 35°C menores que las mezclas calientes. A través de dicha reducción, este producto permite la consecución de todas las ventajas o beneficios mencionados para las mezclas semicalientes: emisiones reducidas, consumo energético menor, mejor trabajabilidad, posibilidad de incrementar la cantidad de asfalto reciclado,...[56]



**Figura 5 - Imagen de Advera en polvo. Fuente: adverawma.com**

El proceso en el que se basa es exactamente el mismo que el anterior. Son aluminosilicatos hidratados, que contienen entre un 18 y un 21% de agua cristalizada. El tamaño y la calidad del producto cumplen con los estándares necesarios para conseguir la consistencia adecuada. Además, se trata de un producto no dañino para trabajadores y medio ambiente (HMIS/NFPA Code 1, 0, 0 y GRAS) [18].

Esta tecnología ha sido usada con éxito en todos los tipos de mezclas asfálticas, incluyendo aquellas modificadas con polímeros, e incluso con caucho. Añadida con una dosificación del 0.25% en peso de la mezcla, es fácil de manejar y ofrece beneficios en capas de base, rodadura y emulsiones bituminosas. Mediante los estudios realizados en laboratorio, su efectividad ha quedado patente.

### 3.1.3 Double Barrel Green® System

Double Barrel Green® System es una tecnología WMA de la compañía norteamericana Astec, que usa un sistema multi-boquilla para la creación de mezclas a menor temperatura sin el uso de aditivos más caros, o cementos asfálticos especiales. En la web del producto se asegura que los humos y las emisiones son disminuidos drásticamente sin que se comprometa la calidad de la mezcla. Es un sistema opcional, que usa agua para producir mezclas semicalientes mediante

procesos de espumación, y que son inodoras, carentes de humos y que duran más tiempo. Al contrario que otras tecnologías o productos WMA, el sistema Double Barrel Green no requiere la adición de aditivos comerciales que encarecen la tonelada de mezcla producida. Sin embargo, sí que requiere de una fuerte inversión inicial, dado que la adquisición de la maquinaria inyectora de agua tiene un elevado coste. La reducción de temperatura que se consigue con el uso de este producto va desde los 50 hasta los 100°F (10-35°C).



Figura 6 - Esquema de la maquina patentada de Double Barrel. Fuente: doublebarrel.com

Cada una de las boquillas que conforman el dispositivo es capaz de circular cemento asfáltico y producir espumación en un ratio de 50 toneladas por hora. Las 10 boquillas con las que cuenta permiten elevar por lo tanto la producción a 500 toneladas por hora, cuando todas las válvulas se encuentran abiertas. Conforme se varían los ratios de producción de mezclas, un ordenador se encarga de abrir y cerrar las válvulas de modo que las boquillas expulsan solo la cantidad de agua necesaria, evitando problemas posteriores de humedad. Una undécima válvula se usa para la recuperación de cemento asfáltico.

Entre las ventajas conseguidas con el uso de esta tecnología y comentadas en su web se encuentran las ya mencionadas de modo más general para las WMA: mejor trabajabilidad, sin humos, mayor inclusión de asfalto reciclado (RAP), mayor vida del pavimento, mayor compactación o menor consumo energético. Además de estos beneficios, El sistema Double Barrel contribuye a un ambiente más sano y menos perjudicial para los trabajadores, elimina la necesidad de extractores de humos en las distintas instalaciones, reutiliza los recursos, consumiendo menos recursos naturales, y no incrementa los costes de producción.

### 3.1.4 UltraFoam GX

Gencor Industries desarrolló un dispositivo encargado de crear asfalto espumado de cara a la producción de mezclas semicalientes. Este dispositivo recibe el nombre de Green Machine UltraFoam GX, y puede ser emplazado en cualquier planta de producción continua. Se trata de una máquina robusta, simple y efectiva, capaz de inyectar agua para



**Figura 7 - Maquinaria para la tecnología UltraFoam GX. Fuente: Gencor.com**

generar el vapor necesario de espumación. Para ello, utiliza solo la energía de la bomba para aportar mezcla asfáltica y agua. Puede adaptarse a distintos ratios de producción sin variar el consumo energético, modificándose con ello la cantidad de agua añadida y las temperaturas de producción [57].

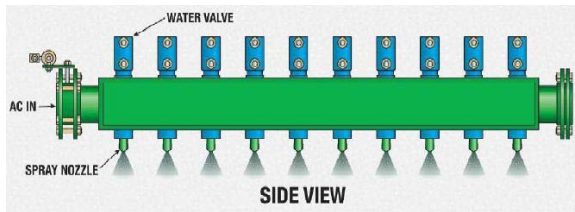
El UltraFoam GX es además un diseño patentado, que posee una serie de orificios variable para la correcta adición de mezcla asfáltica y agua, y un medio para mantener en contacto las dos corrientes de materiales, de manera que la energía de la que se dispone sea utilizada de una manera más eficiente. A la hora de producirse la espumación, el dispositivo se encarga de introducir pequeñas cantidades de agua (entre 1.25 y un 2% del peso total de la mezcla) dentro del flujo de la mezcla. Una válvula de resorte de carga de agua situada en el centro se abre cuando la presión ejercida por el líquido sea lo suficientemente grande. Externamente se encuentra una placa de diafragma que permite a la mezcla circular a diferentes ratios mientras que se mantiene una presión constante. Conforme se aumenta el flujo, los dedos del diafragma se flectan, permitiendo aumentar el área de dicho flujo [57].

Debido a su diseño único, la UltraFoam GX Green Machine mantiene la proporción perfecta entre mezcla y agua en todos los niveles de producción, lo que permite la creación de burbujas más pequeñas y estables, que lleva a asfaltos espumados más consistentes.

### 3.1.5 LT Asphalt

LT-Asphalt (también conocido como LT-Asphalt) es un grupo de procesos especiales usados para la producción de mezclas asfálticas a temperaturas inferiores a las 100°C. El rango de beneficios ofrecidos por

el uso de esta tecnología ha sido ya comentado en productos anteriores. Este procedimiento fue desarrollado por la empresa Nynas, en colaboración con 4 compañías danesas y el Dutch Road Authorities Innovation Test Centre. A diferencia de otras tecnologías existentes en el mercado, El producto de Nynas permite al productor generar mezclas asfálticas con un contenido de betún de hasta el 7%, dado su proceso único de inyección de agua [58].



**Figura 8 - Esquema para la introducción de agua en el mecanismo LT Asphalt. Fuente: Nynas.com**

Las características principales del proceso son la utilización de un método específico de inyección de espuma, un betún específico (Nyfoam) y un diseño de la mezcla a medida. A través del proceso de diseño, el material utiliza la humedad atrapada en la mezcla para dar a la misma una trabajabilidad buena a temperaturas inferiores a los 100 °C. Aditivos específicos eliminan el agua inerte una vez compactada la mezcla, permitiendo a la misma comportarse tal y como una mezcla caliente, y como tal debe ser tratada [58].

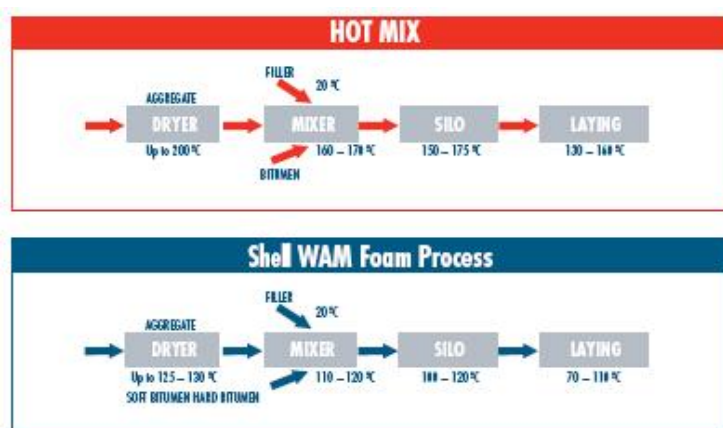
### 3.1.6 WAM Foam

WAM Foam (Warm Asphalt Mixes with Foam) es un proceso patentado desarrollado conjuntamente entre Shell Global Solutions y Kolo Veidekke en Noruega. En el proceso de producción de WAM Foam dos grados diferentes de betún, uno blando y otro duro, son combinados junto con los áridos. Esta tecnología hace posible la producción de mezclas asfálticas a temperaturas entre los 100 y los 120°C y compactadas desde 80 hasta los 110°C [1].



En las plantas modificadas para acoplar el sistema WAM Foam primero se mezcla el betún blando con los áridos para conseguir un pre-envuelta correcta y posteriormente el betún espumado, que es más duro, se introduce. La viscosidad del betún blando se elige de modo que a temperaturas menores de los 100°C pueda envolver completamente el árido. El componente duro se añade de forma espumada y debe tener una penetración a los 25°C de entre 1 y 10 mm., por lo que grados de penetración estándares tales como 10/20, 20/30, 35/50, 50/60 y 70/100 son apropiados para ser usados como betún duro [59].

La proporción de cada tipo de betún se determina a partir de la penetración que se desea



**Figura 9 - Diferencia entre el mecanismo convencional de fabricación y WAM Foam. Fuente: wamfoam.com**

para la combinación final. En algunos casos es recomendable la adición de un agente que mejore la cohesión para reducir la sensibilidad al agua [6]. La idea que subyace en todo el proceso anteriormente explicado es conseguir un betún que provea a los áridos con una envuelta buena, y al mismo tiempo permita una buena trabajabilidad de la mezcla [5].

Para producir el betún espumado se trabaja como hemos visto para otros productos. Se inyecta agua fría en una proporción de entre 1 y 5% de peso del ligante, dentro del betún caliente. Cuando ambos materiales entran en contacto, el agua se evapora y produce un aumento del volumen de la mezcla, aunque dicho vapor poco a poco va desapareciendo con el tiempo y el betún recupera sus propiedades originales. Mediante esta expansión del volumen se consigue que la envuelta de los áridos sea mejor [20].

Las plantas asfálticas para la producción de este tipo de mezclas necesitan ser modificadas, de forma que se las dote con un dispositivo de espumación y un buen sistema de extracción, para de este modo poder compensar la presión que se produce en la mezcladora durante el proceso de espumación. Se trata por lo tanto de modificaciones un tanto caras, comparadas con otros métodos descritos anteriormente. En una planta discontinua, el betún espumado se produce inyectando agua dentro de la tubería del betún mediante boquillas especiales justo antes de que éste entre en la mezcladora y una máquina de aire se encarga de limpiar impurezas de las tuberías y el tambor de



espumación después de cada proceso. La capacidad de producción de la planta se mantiene para todo tipo de mezclas con el uso de esta tecnología [59].

Aunque no se ha dicho en los apartados anteriores, el problema existente para las tecnologías que se basan en procesos de espumación mediante la adición directa de agua es que en el laboratorio no se pueden reproducir las condiciones de fabricación. Por este motivo, los resultados que se han obtenido a partir de investigaciones provienen todos de las empresas privadas que desarrollan estos productos, mientras que para el resto de tecnologías distintos organismos públicos (universidades, centros de investigación) también han participado en la fase de investigación y desarrollo [14].

### 3.1.7 Low Energy Asphalt

En 2005, la compañía francesa McConnaughay introduce por primera vez una tecnología por aquel entonces emergente, conocida como Low energy Asphalt. El principio de este proceso subyace en el mezclado secuencial. A los áridos gruesos se les introduce el betún con un aditivo químico, y seguidamente se añade a la mezcla arena húmeda encargada de crear la correspondiente espumación. La fracción de arena, que puede representar porcentajes de hasta el 40% del total de la mezcla, no se calienta cuando se usa este proceso. Dado que dicha fracción (conocida como fracción fina), contiene la mayor parte de la humedad, para secarla se requiere por tanto una gran cantidad de energía. El Low energy Asphalt debería ser extendido a una temperatura ideal de alrededor de 90°C (por lo que podría englobarse dentro de las templadas, y no semicalientes) y afirma conseguir la mayor reducción de consumo energético de entre las tecnologías de mezclas semicalientes disponibles [60].

Modelos de transferencia de calor desarrollados en Europa por el profesor Yves Le Goff indican que una reducción de entre 40 y 55% se puede conseguir en el consumo energético. A partir de trabajos preliminares de laboratorio, se determinó que con el uso de algunos productos químicos europeos, las mezclas realizadas mediante el proceso LEA presentaban un rendimiento igual que el de las HMA equivalentes.

### 3.1.8 Low Emission Asphalt

El principio en el que se basa este producto o tecnología es exactamente en el mismo que el anterior, el mezclado secuencial de los áridos sin haber procedido al secado de los finos.

Sin embargo, el desarrollo más exhaustivo que se ha llevado a cabo del agente químico que se adiciona al ligante ha llevado a la aparición de este nuevo procedimiento, que se caracteriza por una menor emisión de gases, mejorando de ese modo al anterior Low Energy Asphalt [1].

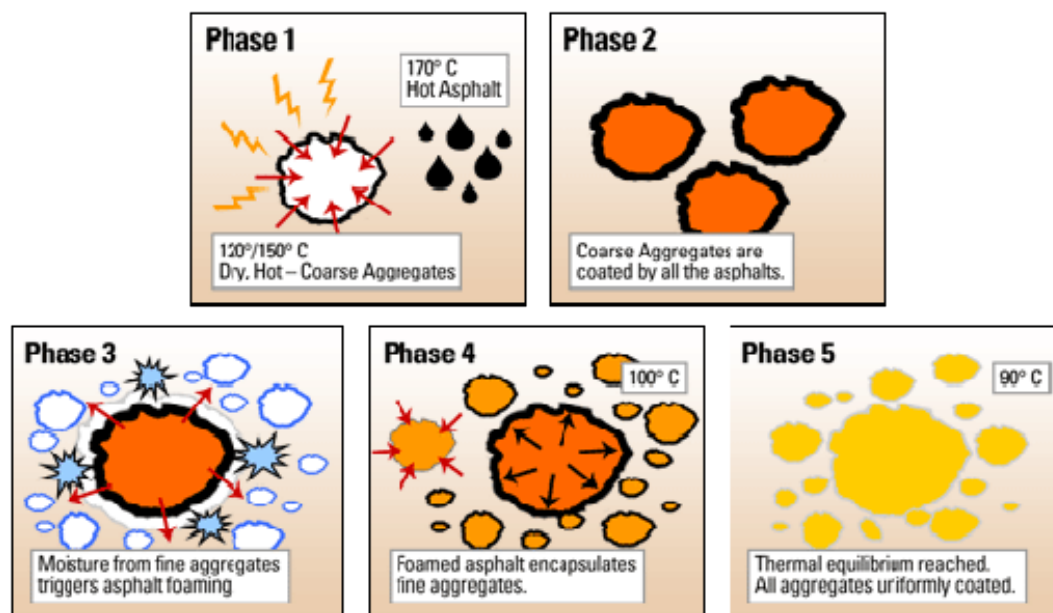


Figura 10 - Fases por las que pasa el árido en el proceso Low Energy Asphalt y Low Emission Asphalt. Fuente: McConnaughay.com

### 3.1.9 LEAB

El proceso LEAB, que se basa en el asfalto de bajo consumo energético, fue desarrollado por BAN en Holanda. Es una comercialización de la investigación acerca de mezclas templadas llevada a cabo por Kim Jenkins. En los ensayos de laboratorio, el agregado se dividió en fracción gruesa y fina, y se añadía agua al ligante para facilitar la envuelta para posteriormente realizar un proceso de mezclado en dos fases [5].

En el proceso LEAB, no se añade en ningún momento agua a los áridos, sino que se inyecta mediante boquillas al betún. BAM usa una serie de seis inyectores con este fin, los cuáles son retráctiles, pudiendo retirarse para fabricar mezclas calientes. Un aditivo basado en amidas se añade en una proporción del 0.1% de peso de ligante, inmediatamente antes de

la espumación. El aditivo ayuda a dar estabilidad al ligante espumado y aumenta la adhesión. Es similar a aquellos usados para producir emulsiones y se cree que es una amida de ácidos grasos [5].

## 3.2 ADITIVOS ORGÁNICOS

### 3.2.1 Sasobit

Sasobit es una cera Fischer-Tropsch que se comercializa en forma de polvo blanco o granulada (también directamente mezclada con betún lista para usar en Alemania). Es un producto extraído del proceso de producción de hidrocarburos líquidos a partir de gas de síntesis. En este proceso, un 10% de cera puede obtenerse usualmente. Se trata de una cera de cadena larga alifática

hidrocarbonatada, con un punto de fusión que va desde los 85°C hasta los 115°C [16]. Una de sus principales



**Figura 11 - Sasobit en forma de polvo y granular. Fuente: D'Angelo et al. [16]**

características, que la hace realmente útil para su uso en los

procesos de las WMA, es que posee alta viscosidad a temperaturas bajas, mientras que a altas temperaturas su viscosidad disminuye enormemente. Cuando se enfría la cristalización comienza a los 105°C y se completa a los 65°C, formando unas partículas microscópicas regularmente distribuidas. A temperaturas de servicio, Sasobit forma una estructura enrejada en el ligante que da estabilidad a la mezcla. De acuerdo a la información contenida en su web, con la adición de un 3% de Sasobit por peso de ligante, el punto de ablandamiento disminuye entre 20-35°C y el grado de penetración cae entre 15-25%. Esto explica la resistencia encontrada a roderas en las mezclas modificadas con Sasobit [5].

Sasol Wax afirma que Sasobit hace posible convertir betunes de grados más blandos a betunes más duros, mientras que al mismo tiempo también mejora la deformación a rendimientos de altas temperaturas. Sasobit se puede combinar con polímeros que contribuyan a dar elasticidad a bajas temperaturas. Esta mejora lleva al desarrollo de Sasoflex, que es una mezcla compuesta de Sasobit, polímeros y un agente de cohesión (Sasolink). El componente Sasobit (un plastómero) mejora la rigidez a altas temperaturas, mientras que el polímero (un elastómero) mejora la flexibilidad a bajas temperaturas [61].

Sasobit está disponible en forma de pequeños copos para su adición fundida o como pequeñas bolas que se adiciona directamente a la mezcla. En Europa, Sudáfrica y Asia [6], la cera se añade directamente a los áridos como pequeñas bolas usando un medidor de dosis. No se han encontrado indicaciones de que exista diferencia de estabilidad o fluidez de las mezclas producidas con este procedimiento en comparación con aquellas producidas mediante la adición de ligante conteniendo Sasobit directamente [12]. En los Estados Unidos, Sasobit se mezcla directamente con el ligante en la planta, y éste se inyecta seguidamente en el tambor de mezclado al mismo tiempo se añaden otros aditivos [6].

### 3.2.2 Asphaltan B

Asphaltan B es un producto de Romonta GmbH. Está disponible comercialmente en sacos de 25 kg. Está creado especialmente para rolled asphalt, y compuesto por una mezcla de sustancias basadas en ceras de Montana e hidrocarburos de alto peso molecular. La cera cruda de Montana se obtiene en Alemania, Europa del Este y ciertas áreas de los Estados Unidos, en algunos tipos de lignita y carbón marrón, que se han formado durante millones de años a partir de la transformación de vegetación subtropical fosilizada. Dada su alta estabilidad e insolubilidad en el agua, la cera persiste durante periodos geológicos más largos [62].

Romonta recomienda añadir Asphaltan B entre un 2 y un 4% del peso del betún. Se puede añadir en la planta de mezclado o directamente al betún, y además también puede contener polímeros modificados. El punto de fusión es aproximadamente 100°C [5]. De manera similar a las ceras Fischer-Tropsch, esta cera actúa como un mejorador de la fluidez de la mezcla, con la asociada reducción de temperaturas de producción. Romonta no especifica cuanto se reduce la temperatura de producción, pero algunas investigaciones aseguran que estas disminuciones se encuentran en el rango de los 20-30°C. También de manera similar a Sasobit, Romonta afirma que este producto aumenta la compactabilidad y la resistencia a roderas.

### 3.2.3 Licomont BS

Licomont BS 100 es un modificador asfáltico basado en ácidos grasos derivados que pueden incrementar la vida útil de los pavimentos, particularmente en ambientes que se encuentran a altas temperaturas. Las ceras conocidas como amidas ácidas grasas se caracterizan por ser producidas sintéticamente mediante la reacción de amidas con grasas ácidas. Generalmente, el punto de fusión se encuentra entre los 140°C y los 145°C y la solidificación entre los 135°C y los 145°C [1]. Durante el enfriamiento, las amidas forman

cristales que proporcionan al ligante una mayor rigidez y el grado de penetración disminuye de 10 a 15%. Mediante la mejora de la adhesión y de los niveles de compactación de la mezcla asfáltica e incremento de la dureza del asfalto, se asegura que la resistencia óptima al tráfico se consiga con una menor temperatura de producción. Esta menor temperatura también reduce el consumo de energía durante la producción de la mezcla, así como en el transporte y extendido. El uso de temperaturas de extendido menores también reduce la radiación de calor y la generación de gases [63].

### **3.2.4 3E LT y 3E BD**

3E es un agama de mezclas asfálticas no dañinas para el medio ambiente y eficientes energéticamente, con los mismos campos de aplicación que las mezclas calientes convencionales, sin preocupación del nivel de tráfico. Las temperaturas de fabricación y extendido son entre 40 y 45°C menores que las usuales, lo que da lugar a una reducción de gases de efecto invernadero de entre 15 y 25%. También se produce un ahorro energético, y menos humos durante el extendido, lo que da lugar a un ambiente de trabajo y de la obra más saludable. La reducción anteriormente mencionada no altera la capacidad de carga del pavimento, ni su rendimiento mecánico [64].

Colas desarrolló dos procesos que se basan en los criterios expuestos: 3 E LT y 3 E DB. 3 E LT conlleva la modificación de la reología del betún con agentes específicos añadidos al ligante. La mezcla se fabrica en plantas convencionales, y no requiere de equipamiento específico ni de ninguna modificación del proceso de la envuelta. La mezcla 3 E DB usa el proceso de envuelta secuencial incluyendo dos ligantes con penetración diferente en una planta discontinua con dos circuitos de betún separados. Las mezclas se aplican con extendedoras en temperaturas que van desde 40 a 45°C inferiores a las convencionales. Las secciones pueden ser reabiertas al tráfico cuando la mezcla se ha enfriado a temperaturas cercanas a los 50°C [64].

## **3.3 ADITIVOS QUÍMICOS**

### **3.3.1 Evotherm**

Evotherm es un paquete químico diseñado para promover la adhesión, envuelta, compactación y trabajabilidad de las mezclas asfálticas a temperaturas menores. Diferentes paquetes químicos están disponibles comercialmente para distintos tipos de áridos. La principal diferencia entre los distintos paquetes es los agentes de adhesión. Un

componente base de los compuesto químicos son los surfactantes, los cuales actúan como emulsificadores. Aproximadamente el 50% del paquete químico está derivado de recursos renovables [5]. Evotharm permite una reducción de entre 50°C hasta 75°C, tanto en la producción como el extendido, en comparación con las mezclas calientes.

Inicialmente, el paquete Evotharm se comercializó en forma de emulsión asfáltica con un residuo de ligante de alrededor del 70%. Este producto fue el pionero, denominado Evotharm Emulsion Technology, o Evotharm ET [22]. La emulsión se almacena a una temperatura de 80°C, y puede disponerse directamente desde camión cisterna, o bien en tanques móviles o fijos instalados en la planta. A la hora de establecerse el valor óptimo de ligante en la planta es necesario tener en cuenta el 30% de agua que contiene la emulsión. La mayoría de esta agua se libera en forma de vapor durante el mezclado. La mezcla semicaliente resultante se encuentra totalmente envuelta y del mismo color que las mezclas convencionales, al contrario que las mezclas en frío [6].

Otra tecnología de la misma compañía (MeadWestVaco) es la denominada Evotharm Dispersed Asphalt Technology, o Evotharm DAT. La química es la misma que la vista para Evotharm ET, pero se diferencia en que el paquete químico se añade directamente junto con una determinada cantidad de agua dentro de la línea de producción asfáltica, justo antes de que entre en el tambor de mezclado. La principal ventaja de esta nueva tecnología es que los costes de envío son bastante menores, a la par que permite al productor cambiar de manera rápida entre HMA y WMA [5].

El último producto comercializado por la compañía, y que sigue la misma línea de los anteriores, es el denominado Evotharm 3G. Ha sido desarrollado en colaboración con ParagonTechnical Services y Mathy Technology & Engineering. Se trata de una forma de Evotharm con ausencia de agua, apropiado para aplicar de una manera más eficiente los aditivos contenidos en la tecnología Evotharm en la planta o en la terminal. Las temperaturas de producción se reducen entre 33 y 45°C [54]. Este producto ha sido también comercializado como REVIX, pero actualmente recibe el nombre únicamente de MWV Evotharm 3G.

Desde carreteras de bajo volumen de tráfico a autovías con alta carga de tráfico, Evotharm ha mostrado un rendimiento adecuado a lo largo de más de 100 proyectos en Estados Unidos, así como Francia, España, Canadá, Sudáfrica, México y China. Resultados obtenidos a partir de test de acelerado de rendimiento del centro para asfaltos de los EE.UU (NCAT) han arrojado que pavimentos realizados usando la tecnología Evotharm pueden actuar

durante más de 10 años con cargas pesadas de tráfico de manera excepcional con prácticamente ninguna deformación [54].

### 3.3.2 Cecabase RT

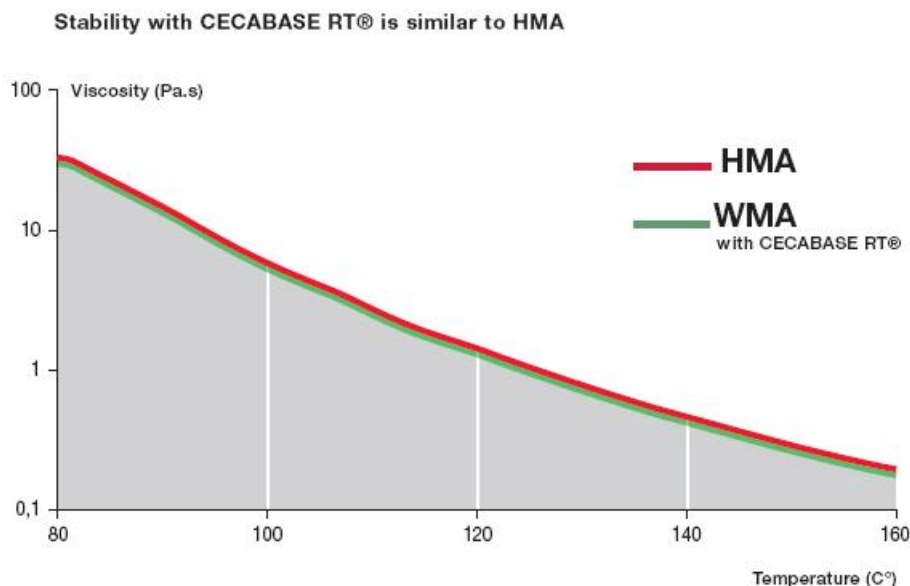
Como resultado de la investigación llevada a cabo por parte del grupo Arkema, en 2006 empieza a comercializarse el producto CECABASE RT. En un año, alrededor de 10 proyectos fueron llevados a cabo con éxito y 80.000 toneladas de mezclas semicalientes fueron producidas usando este aditivo en 2006 [65].

El aditivo CECABASE se basa en agentes tensoactivos compuestos al menos por un 50% de materia prima renovable. Cuando se mezcla con el betún, la temperatura de extendido puede reducirse hasta en 50°C sin que haya un efecto adverso en el rendimiento del pavimento. Comparado con las mezclas calientes, el uso de este aditivo permite reducir el consumo de energía entre 20 y 50%, dependiendo del proceso, y considerablemente reduce las emisiones dañinas a la atmósfera.

Se trata pues de un proceso que usa menos energía y que a la postre es por lo tanto menos dañino con el medio ambiente. Un asfalto típico está compuesto de un 95% de áridos y alrededor de un 5% de ligante. La mezcla se calienta hasta 160-180°C para alcanzar la trabajabilidad requerida para su extensión y compactación. La incorporación del aditivo desarrollado por CECA, entre 2 y 4 kg. por cada tonelada de mezcla asfáltica, permite reducir dicha temperatura hasta los 120°C, al mismo tiempo que permite conservar las mismas propiedades que las mezclas convencionales [65].

Ceca afirma que el desarrollo de este producto se llevó a cabo teniendo en cuenta que en ningún momento debería reducir la productividad en la construcción de asfaltos, asegurando que la introducción del aditivo a la mezcla no altera el proceso general y que es muy sencilla de realizar.

### 3.3.3 Rediset WMX



**Figura 12 - Gráfico que presenta la similitud las mezclas convencionales y las WMA realizadas con Cecabase. Fuente: Ceca.com**

En 2007 AkzoNobel introdujo un nuevo sistema de producción de mezclas semicalientes denominado Rediset WMX en el intento de mitigar las deficiencias observadas en las tecnologías WMA existentes por aquel entonces. En particular, este sistema fue diseñado con objeto de solventar los problemas existentes con el agua en las mezclas semicalientes; la rigidez reducida comparada con las mezclas calientes; y la incerteza existente en las propiedades a bajas temperaturas [23].

Stripping (incorrecta adhesión entre árido y betún debido a la presencia de agua) es un problema bastante conocido, dando lugar a la pérdida de partículas, baches, roderas y deformaciones plásticas permanentes. Rediset WMX está formulado de tal modo que se mejore la adhesión entre el árido y el betún y así prolongar la vida útil del pavimento y reducir el mantenimiento durante dicho periodo [24].

Rediset WMX entra en el grupo conocido como agentes químicos modificadores de asfalto, el cual no implica la adición de agua a la mezcla o al betún. Rediset WMA consiste en un aditivo químico sólido en forma de pastillas que se añade al ligante antes o durante el proceso de mezclado. La tecnología amina del producto le dota de propiedades



promotoras de la adhesión (habilidad para desplazar el agua de la superficie de los áridos húmedos) y un efecto antioxidante, mientras que la forma física del producto provoca cierta reducción de la viscosidad a las temperaturas de la mezcla, aumentando la rigidez a temperaturas de servicio [66].



El conocido como “warm mix effect” (efecto de mezclas semicalientes) se piensa que viene provocado de forma primaria por la actividad superficial de los surfactantes aminas, tanto por el efecto de lubricación en los áridos como por el efecto dispersante que tiene sobre el mástic asfáltico [23].

**Figura 13 - Rediset y su forma granular/ pastilla. Fuente: RedisetWMX.com**

### 3.3.4 Iterlow T

La tecnología Iterlow se basa en un producto líquido, que se añade al betún en cantidades de entre 0.3 y 1% y que permite la producción de mezclas semicalientes. Actuando en la tensión superficial del betún, no modifica las características físico-químicas del mismo (R&B, penetración, viscosidad, densidad). Iterlow se puede usar de manera sencilla, ya que no hay necesidad de modificaciones en la planta y no conlleva la adición de agua a la mezcla. Fue usado por primera vez en 2002 en áreas de prueba alrededor de Europa, en capas de rodadura, intermedias y base, así como con la adición de RAP [67].

Los beneficios que trae el uso de este producto son los ya numerosos nombrados para otras tecnología WMA. Así pues, la disminución de la temperatura de producción en más de 40°C limita las emisiones de gases de efecto invernadero y reduce el consumo energético. Las características mecánicas de la mezcla resultante son las mismas que las de una mezcla realizada a temperaturas estándar [67].

## 4 LA ZEOLITA

Como ya se ha visto en la sección anterior, la zeolita es un material que resulta fundamental en la producción de un determinado tipo de mezclas semicalientes; las que se basan en el método indirecto de los procesos de espumación. Su conocimiento se remonta a mediados del siglo XVIII, pero sin embargo no fue hasta la década de 1950 cuando realmente empezaron a verse las grandes ventajas que podría tener este producto que se extrae de manera natural de distintos yacimientos. Sin embargo, también es posible su fabricación sintética, y es en esta forma de la zeolita en la que se basan los productos comerciales que hemos comentado anteriormente: Aspha-min y Advera.

Dada su importancia, en este apartado se va a tratar de profundizar tanto en la composición y estructura de este material, muy importantes para su posterior comportamiento, como en su modo de actuar y en sus propiedades.

### 4.1 Definición, composición y estructura

Se define la zeolita como aluminosilicatos hidratados y cristalinos compuestos de elementos del grupo I y II, en particular sodio, potasio, magnesio, calcio, estroncio y bario. Estructuralmente las zeolitas son sistemas de aluminosilicatos que se basan en infinitésimas redes tridimensionales de tetraedros de  $\text{AlO}_4$  y  $\text{SiO}_4$ , unidos unos a otros mediante los oxígenos que comparten [25]. De manera general, la zeolita

se recoge bajo la siguiente fórmula científica:

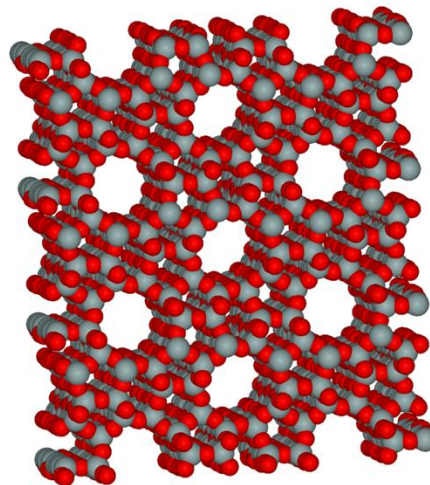
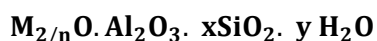


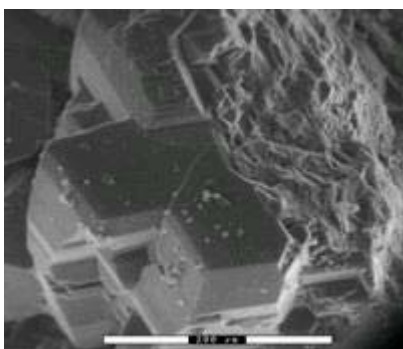
Figura 14 - Gráfico de la estructura interna de la zeolita. Fuente: wikipedia.org

En la anterior fórmula de óxido,  $x$  es generalmente igual o mayor que 2 dado que los tetraedros  $\text{AlO}_4$  están unidos a los tetraedros  $\text{SiO}_4$ ,  $n$  es la valencia del catión. La estructura contiene canales y huecos interconectados que se ocupan por los cationes y las moléculas

de agua. Los cationes tienen una movilidad alta y generalmente pueden intercambiarse con otros cationes. El agua intracrystalina de la zeolita en muchos casos es expulsada continuamente y al contrario, absorbida [26].

Es por lo tanto evidente que dentro de la estructura porosa de la zeolita, puede existir agua “almacenada”. Entre las moléculas polares de agua y el sistema de entramado de la zeolita fuerzas dipolares actúan de un lado. Por otro lado moléculas de agua situadas alrededor en lugares cristalográficos actúan como disolvente de los cationes de la extraestructura (estructura exterior de la zeolita formada por cationes tales como  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ , ...), que dependen de la distribución de cargas del entramado causado para la distribución Si,Al junto con la distribución de cargas en el sistema de huecos. La desorción del agua zeolítica depende del tiempo y de la temperatura [27]. Esta transferencia está limitada por el diámetro de los poros de la zeolita, ya que sólo podrán ingresar o salir del espacio intracrystalino aquellas moléculas cuyas dimensiones sean inferiores a un cierto valor, el cual varía de una zeolita a otra [28].

En algunos casos, la zeolita tanto natural como sintética, en el intercambio de cationes o durante la deshidratación, puede sufrir daños estructurales en el entramado. También en ciertos tipos de zeolita sintética, los cationes de aluminio pueden ser sustituidos por iones de galio o los de silicio por iones de germanio o fósforo. Para poder ser usada como cedazo (de manera que contenga agua para después ser liberada), la estructura de la zeolita después de deshidratarse completamente debe permanecer intacta.



**Figura 15 - Imagen a microscopio electrónico de la estructura interna de la zeolita. Fuente: google.com**

La zeolita natural se forma a partir de roca volcánica y capas de cenizas que reaccionan al entrar en contacto con el agua alcalina. También cristaliza en ambientes post-deposicionales en periodos que van desde los miles hasta los millones de años en cuencas marinas profundas. Cuando se forman de manera natural, las zeolitas rara vez son puras y suelen estar contaminadas por distintos minerales, metales, cuarzo y otras zeolitas. Por esta razón, la zeolita natural está generalmente excluida de muchas aplicaciones comerciales, donde la uniformidad y la pureza son esenciales.

## 4.2 Propiedades

### 4.2.1 Intercambio iónico y selectividad

El intercambio iónico es una de las propiedades más importantes de las zeolitas debido a que por un lado se pueden llevar a cabo modificaciones de las zeolitas, para cambiar sus propiedades superficiales (afinidad por compuestos orgánicos) y por otro lado, esta propiedad de intercambio iónico es útil en más de un proceso industrial, en la agricultura, en la acuicultura y en usos ambientales [28].

El comportamiento del intercambio iónico en las zeolitas depende de varios factores que determinan la selectividad, siendo algunos de ellos:

- Naturaleza de los cationes: tamaño, carga iónica, forma.
- Temperatura
- Concentración de los cationes en solución.
- Aniones asociados con los cationes en solución.
- Estructura de la zeolita-topología de la red, densidad de carga de la red

### 4.2.2 Difusividad aparente

En zeolitas, la cinética del proceso está controlada por la difusión del ión entre los canales de la estructura y se ha demostrado que para partículas esféricas el coeficiente de difusión aparente  $D^i$  está dado por:

$$\frac{q_t}{q_e} = \frac{6}{r} \sqrt{\frac{D^i t}{\pi}}$$

en donde:

$q_t$  y  $q_e$  son las cantidades que se absorben del ion bajo estudio al tiempo  $t$  y al equilibrio, respectivamente (meq/gZ),  $r$  es el radio de las partículas (cm),  $t$  es el tiempo de absorción (s). El coeficiente de difusión aparente  $D^i$  es independiente de la composición y varía con la temperatura [25].

#### 4.2.3 Capacidad de intercambio iónico

El cociente Si/Al determina la capacidad total de intercambio (meq/g) en una zeolita y se determina fácilmente contando el número de átomos de aluminio en la celda unidad ( $N^{Al}$ ) según la ecuación siguiente:

$$C = (N^{Al} / N_{Av}) / \rho V_c$$

en donde  $N_{Av}$  es el número de Avogadro,  $\rho$  es la densidad de la zeolita y  $V_c$  es el volumen de la celda unitaria. La relación se basa en el hecho de que  $N^{Al}/N_{Av}$  es el número total de equivalentes de cationes intercambiables por celda unidad y  $\rho V_c$  es la masa de la celda unidad. Por lo tanto la capacidad de intercambio iónico esperada para las zeolitas naturales (CIIE) está en función de la densidad de carga de la estructura aniónica de la zeolita, es decir del grado de sustitución del  $Al^{3+}$  por el  $Si^{4+}$  en la red cristalina. Cuanto mayor sea dicha sustitución mayor será la cantidad de cationes necesaria para mantener la electroneutralidad y por lo tanto se tendrá una alta CIIE.

#### 4.2.4 Modificación de las propiedades superficiales de las zeolitas

El tratamiento de zeolitas naturales con surfactantes catiónicos, altera dramáticamente la química de su superficie. Los cationes orgánicos se intercambian irreversiblemente con los cationes nativos tales como  $Na^+$ ,  $K^+$ , o  $Ca^{2+}$ . La modificación de las zeolitas con surfactantes, les da la capacidad de poder absorber moléculas orgánicas, mientras que mantiene su capacidad de absorber cationes de metales pesados. Las ZMS han mostrado también que pueden remover selectivamente aniones de metales fuertemente hidrolizados [28].

### 4.3 Aplicación a las mezclas semicalientes: Aspha-Min y Advera

Dado que la intención de este documento es revisar el estado de la técnica de cara a la posterior investigación que se realiza acerca de la zeolita natura cubana, sería bastante interesante profundizar de manera particular en los dos productos comerciales que actualmente utilizan un principio similar, como son Aspha-Min y Advera.

Así pues, y basándonos en documentación facilitada por ambas compañías (Eurovia GmbH y PQ Corporation), se definen las zeolitas sintéticas como aluminosilicatos de sodio, de tipo A y en forma de polvo, cuyo contenido en agua varía entre un 18 y un 22%, quedando por lo tanto entre un 78 y un 82% de zeolita **[8]**. En el caso de Advera, su única presentación comercial consiste en forma de un fino polvo blanco, mientras que Aspha-Min se encuentra tanto en forma de polvo (tamaño medio de partícula de 3.5  $\mu\text{m}$ ) como de gránulos finos (tamaño medio de partícula de 380  $\mu\text{m}$ ). Ninguno de los dos es soluble en agua, y el pH varía entre 10.1 y 11.4 **[56]**.

Como ya se ha comentado anteriormente, la principal característica de las zeolitas es la propiedad de absorber y ceder agua sin dañar en ningún momento su estructura cristalina. Cuando se libera esta agua, el contacto de la misma con el betún la convierte en vapor, que queda atrapado dentro del ligante, aumentando su volumen y provocando una mayor fluidez del mismo. El rango de temperaturas entre las que tiene lugar este efecto va desde los 85 hasta los 180°C **[20]**.

## 5 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

A lo largo de esta sección se intentará determinar de manera general aquellos aspectos técnicos que sufren algún tipo de modificación con respecto a las mezclas convencionales como consecuencia de la introducción de las tecnologías de mezclas semicalientes. Aunque es un tema difícil ya que cada país tiene normativa o métodos de evaluación diferentes, sí es cierto que hay puntos comunes en todas las mezclas. Será sobre estos temas donde nos centraremos. Para ello, en un primer momento trataremos el ligante, destacando aquellos aspectos concernientes al mismo que se ven afectados. Seguidamente, también se comentará las modificaciones que pudiera tener el diseño de la mezcla. Para terminar este apartado, de manera breve se tratará el tema de las plantas de mezclas bituminosas, destacando si es necesario o no realizar modificaciones en el proceso de producción de las mismas, dependiendo de qué tecnología sea la elegida.

### 5.1 Betún

Con objeto de analizar cada uno de los aspectos afectados por los procesos desarrollados para fabricación de mezclas semicalientes, en esta sección se estudiará las propiedades del betún en relación con estas mezclas. En general, estas modificaciones son válidas para todas las tecnologías, aunque las basadas en procesos de espumación por el método directo necesitarían un análisis más profundo que no se va a realizar.

El betún es un material complejo en lo que respuesta a tensión se refiere. Dicha respuesta depende principalmente tanto de la temperatura como del tiempo de carga. Del mismo modo, dependiendo de ambas variables, el comportamiento del mismo será viscoso o elástico. Así pues, a altas temperaturas y periodos de carga largos, el betún se comporta como un líquido viscoso mientras que a bajas temperaturas o periodos de carga pequeños se comporta como un sólido elástico. A la hora de su comportamiento en servicio, lo más normal es hablar de un material visco-elástico [29].

Cambiar las características visco-elásticas del betún a temperaturas de producción y de servicio es una de las principales partes de las tecnologías semicalientes. La modificación del betún mediante aditivos y/o la reducción de la viscosidad del mismo a temperaturas de producción y extendido permiten reducir la temperatura a la cual el betún es manejable/trabajable. Por eso mismo es necesario tener un profundo conocimiento de las propiedades del betún y de su influencia en el comportamiento visco-elástico del ligante

para determinar las temperaturas más ventajosas de producción y extendido y predecir el comportamiento del asfalto a largo plazo [1].

Para entender mejor el efecto que cada una de las propiedades del betún puede tener en la fabricación de mezclas semicalientes y viceversa, trataremos cada una de estas propiedades de manera independiente:

#### **5.1.1 Viscosidad**

El cambio en la viscosidad (reducción a altas temperaturas y para algunos productos aumento a bajas) del ligante es el principio más importante que hace posible producir mezclas asfálticas a menores temperaturas con una correcta envuelta y sin pérdida de trabajabilidad a la hora de la extensión. La relación temperatura-viscosidad del ligante es por lo tanto determinante a la hora de decidir los rangos de temperatura a los que producir estas mezclas semicalientes.

#### **5.1.2 Punto de rotura de Fraas**

La consistencia a bajas temperaturas es un problema de implementación de las mezclas semicalientes en climas de fríos inviernos. En estos casos, distintos experimentos han probado el pobre comportamiento de las mezclas a bajas temperaturas (aumento de la fragilidad) como en el caso de aquellas realizadas con aditivos orgánicos, debido a la cristalización de las ceras [30].

#### **5.1.3 Durabilidad y resistencia al endurecimiento**

En el betún el endurecimiento es causado mayoritariamente por la presencia de oxígeno, radiaciones ultravioleta y por los cambios de temperatura. Estas influencias externas causan que el betún endurezca, dando lugar a un decrecimiento de la penetración, un incremento en el punto de ablandamiento y, generalmente, un aumento del índice de penetración [29]. Este es un factor muy importante que debe ser tomado en cuenta de cara a las mezclas semicalientes, dado que se produce un menor endurecimiento en el proceso de producción debido a las menores temperaturas y a una mejor compactación que da lugar a menores huecos de aire en el pavimento.



Históricamente el betún se evalúa con métodos empíricos en su estado original (no envejecido) y las propiedades mecánicas se interpretan a partir de los resultados de los tests realizados, y entonces se aplican a las mezclas convencionales. Esto es válido siempre que las temperaturas de mezclado estén dentro de un cierto rango y de ese modo los procesos que provocan el envejecimiento del betún a corto plazo sean comparables. Las propiedades de absorción de esfuerzos y deformaciones son pues establecidas en el estado original del ligante teniendo en cuenta los procesos de envejecimiento. Toda esta correlación viene como resultado de numerosos años de pruebas tanto en laboratorio como en campo, y han sido implementados de este modo en diferentes normas y especificaciones nacionales teniendo en cuenta, como se ha dicho, los procesos de envejecimiento [1].

Sin embargo, como norma general el comportamiento del betún original es irrelevante y para poder determinar la absorción de esfuerzos en las mezclas asfálticas es necesario conocer el ligante en el estado en el que se encuentra en las mezclas. Todos los betunes cambian sus propiedades después del envejecimiento que sufren en el proceso de producción, pero el grado de este cambio depende sobre todo de la temperatura de producción. Y he aquí la importancia de este apartado, dado que las temperaturas de producción para mezclas convencionales y para mezclas semicalientes son totalmente distintas. Las menores temperaturas utilizadas para las mezclas semicalientes tienden a reducir la permeabilidad y el endurecimiento del betún debido al envejecimiento reducido y puede incrementarse el potencial de deformaciones plásticas permanentes en los estados iniciales del asfalto. De este modo, puede que sea necesario elegir betunes con un grado de penetración menor (más duros) a la hora de trabajar con las WMA [20].

#### 5.1.4 Penetración conservada y punto de ablandamiento

La diferencia más importante entre las mezclas semicalientes y las mezclas convencionales es la reducción de temperatura, que afecta a los valores de la penetración conservada y del punto de ablandamiento. Pero dependiendo de la tecnología usada puede haber también cambios en el ciclo de mezclado y posiblemente en la cantidad de betún (espesor de la película de betún), lo que puede influir en el endurecimiento del betún. La penetración retenida y el aumento en el punto de ablandamiento para ligantes envejecidos en el corto plazo puede ser un buen método para comparar los cambios en las propiedades del ligante entre las WMA y las mezclas convencionales después de su producción. Esto permitiría determinar la necesidad o no de usar un betún más duro para evitar problemas de deformaciones permanentes [1].

## 5.2 Diseño de la mezcla

Los estándares europeos concernientes a mezclas bituminosas (EN 13108-1 hasta -7) han estado en vigor desde el 1 de Marzo de 2008. A partir del análisis de esta normativa, la principal conclusión extraída es que aunque existen límites superiores en las temperaturas de fabricación de las mezclas, no existe ningún tipo de limitación inferior. La única consideración a tener en cuenta es que la densidad in situ sea satisfactoria, lo que debe ser tenido en cuenta por el fabricante. Además, esta normativa europea también trata en algunos de sus apartados el uso de aditivos, sujetos a que el rendimiento de las mezclas sea el mismo. Por todo lo anterior, en ningún momento se contempla la normativa europea como una barrera para la introducción de las mezclas WMA, porque en ningún caso excluye su uso o lo limita [4].

Dependiendo de la situación geográfica, los métodos de diseño de la mezcla usados para determinar los parámetros de una mezcla convencional difieren. Así pues, en EE.UU., el diseño SUPERPAVE está ampliamente implementado, mientras que en Europa el más común es el método Marshall. Ambos han sido usados para tests usando diferentes tecnologías semicalientes. Además de eso, los procesos de mezclas semicalientes también se han probado con diferentes tipos de mezclas asfálticas (densas, Stone Matrix, porosas, asfalto mástico,...). De todas estas pruebas y ensayos, la principal conclusión es que, de manera general, se puede afirmar que no existen restricciones a la hora de usar métodos tradicionales de diseño de mezclas para las tecnologías semicalientes [3]. Sin embargo, en la mayoría de la literatura consultada [1,20,31], se establece que pequeñas variaciones deberían ser introducidas o tenidas en cuenta. Algunos de los elementos específicos del proceso de diseño van a ser discutidos a continuación.

### 5.2.1.1 Granulometría de los áridos

La selección de los áridos en cada una de las mezclas realizadas en la bibliografía consultada se realizó siguiendo las recomendaciones tradicionales establecidas para las mezclas convencionales. Se puede decir que se han realizado todo tipos de asfaltos utilizando las tecnologías semicaliente [20], y en todos los casos, el proceso para realizar los ensayos fue el mismo [8,12,32]. Por lo tanto, mismas granulometrías fueron usadas tanto para las mezclas calientes como para las semicalientes, de modo que posteriormente ambos resultados pudieran ser comparados [11]. Como resultados se obtuvieron que no existen diferencias notables en la selección de granulometrías para las mezclas semicalientes.

### 5.2.2 Aditivos

Considerando algunas de las tecnologías que hemos visto como aditivos a las mezclas convencionales, la dosificación de cada una se debe elegir siguiendo en todo momento las recomendaciones del fabricante, las cuales pueden variar de unos productos a otros [1]. Para los aditivos orgánicos y químicos, generalmente no se usan otros aditivos. En los casos en los que las mezclas calientes llevasen aditivos adicionales, las correspondientes semicalientes deberían también llevarlas [5]. Sin embargo, en los procesos de espumación, debido a la posible pérdida de adhesión y envuelta entre el ligante y los áridos, deberían añadirse agentes promotores de la cohesión. La elección de un tipo de agente en concreto debe hacerse con vistas al hecho de que las menores temperaturas usadas en las WMA pueden llevar a la pérdida de efectividad del efecto promotor del producto.

### 5.2.3 Ensayos de Laboratorio

La mayoría de los laboratorios que han trabajado con mezclas calientes están familiarizados con los procesos a seguir a la hora de analizar las mezclas asfálticas, y cómo interpretar los resultados que se obtienen a partir de ellos. Por este motivo, los análisis rutinarios de las mezclas semicalientes deberían incluir aquellos usados en el análisis rutinario de las HMA (propiedades volumétricas, módulos de rigidez, ensayo de rodadura, sensibilidad al agua, proporción de filler) y en las mismas condiciones de análisis. De manera similar, un análisis completo de WMA debería incluir aquellos tests que de forma usual se realizan a los especímenes de las mezclas calientes. En la mayoría de los casos, los ensayos de laboratorio realizados sobre mezclas de campo se correspondieron con la tendencia vista en las investigaciones de laboratorio [20].

La información anteriormente comentada puede usarse para el caso de las tecnologías basadas en aditivos químicos u orgánicos. Sin embargo, en los productos basados en procesos de espumación el ensayo en laboratorio no es tan simple. Para los productos del método directo no existen trabajos de laboratorio que se hayan publicado, únicamente investigaciones llevadas a cabo por las propias empresas encargadas del desarrollo de los mismos. En el caso de las tecnologías del método indirecto, se debe prestar especial atención de modo que se puedan reproducir las condiciones adecuadas de la manera más cercana posible [1].

Según Chowdhury [20] y Hurley&Prowell [8], aunque se deben aplicar los mismos estándares tanto a las WMA como a las HMA, se deben establecer métodos adecuados de

curado en los ejemplares de las mezclas semicalientes que inicialmente incorporen agua. Sin embargo esta idea ha sido rechazada por posteriores investigadores.

#### 5.2.4 Temperaturas de producción y compactación

Como se ha hablado anteriormente para el caso de otros parámetros, las temperaturas de producción y compactación de las mezclas semicalientes depende de manera primordial de la tecnología usada para su fabricación. Las temperaturas óptimas o las ventanas en las que éstas se producen se determinan con objeto de conseguir una envuelta completa de los áridos y una correcta trabajabilidad en el espacio de tiempo necesario. Aunque existen maneras teóricas de averiguar dichos rangos, puede que éstas no sean de aplicación para las mezclas semicalientes. En estos casos, la evaluación directa de qué temperaturas utilizar puede hacerse mediante un enfoque directo [15]. Así pues, las temperaturas más adecuadas de producción y compactación pueden determinarse comparando la densidad aparente de la WMA en cuestión con la mezcla de referencia convencional. De este modo la temperatura a la que ambas densidades son iguales puede establecerse de manera clara.

Este proceso se encuentra descrito por la Asociación de Pavimentos Asfálticos alemana (German Asphalt Pavement Association) [15], que lo determina como sigue: “La composición óptima de la mezcla asfáltica y la densidad de referencia a las temperaturas de compactación de 135°C y 145°C se determinan llevando a cabo un ensayo de referencia sin el aditivo WMA. Se deben fabricar muestras de mezclas semicalientes con productos WMA a diferentes temperaturas de compactación (ej: 110, 120, 130, 140 y 150°C) de manera que podamos determinar la temperatura adecuada de producción de la mezcla”. Una manera gráfica de representar el proceso anterior puede verse en la Figura 16.

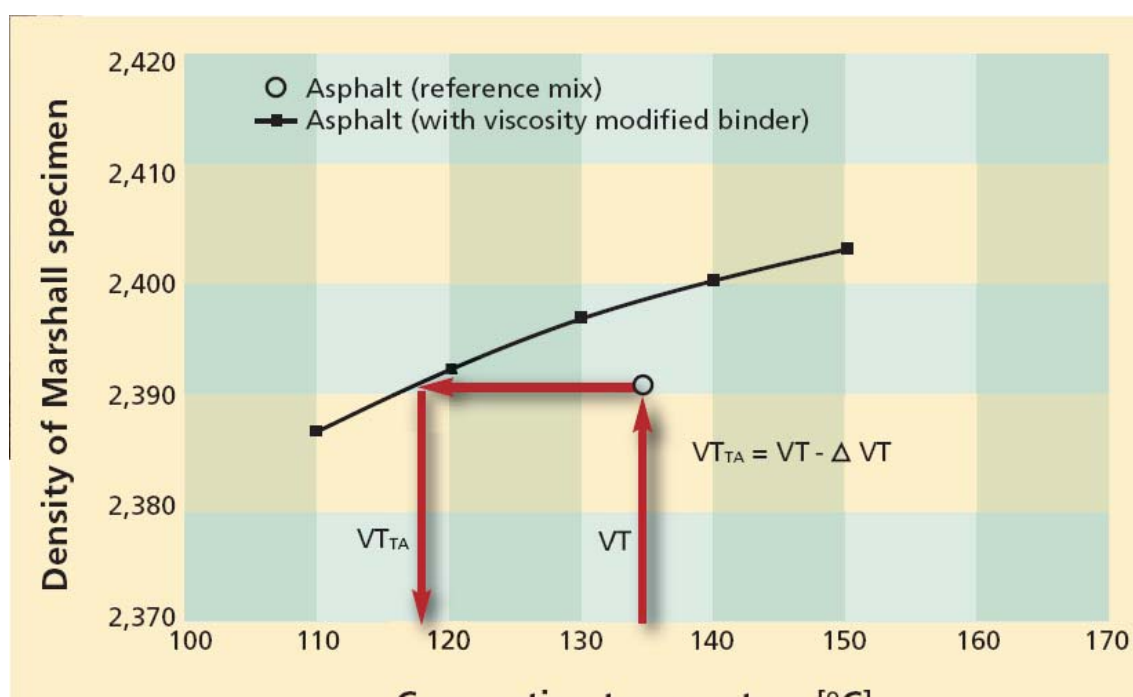


Figura 16 - Imagen que permite entender cómo seleccionar la temperatura de fabricación de las mezclas semicalientes

### 5.2.5 Selección del betún

Aunque el menor envejecimiento del ligante puede considerarse como una ventaja de las mezclas semicalientes (dado que puede traducirse en una mayor vida útil del pavimento), también puede convertirse en un impacto negativo, ya que puede llevar a deformaciones permanentes (roderas) en las etapas iniciales de uso. Por esta razón, pudiera ser necesario elegir una dureza de betún o un grado de betún diferentes [1]. Ha habido algunas investigaciones en torno a este respecto llevados a cabo en el estado de Montana, EE.UU., que han dado lugar a una serie de recomendaciones publicadas por parte del departamento de transporte. Sin embargo, debido a las diferencias en los métodos de diseño entre los países europeos y EE.UU., de modo general estas recomendaciones no pueden seguirse [1]. A pesar de ello, no se debería de manera arbitraria usar un ligante para las mezclas semicalientes de distinta gradación que el usado para las mezclas convencionales. Es más, Romier et al. (2006) estableció que en las mezclas usando el método Low Energy Asphalt incorporaban el mismo ligante que las HMA, en la misma proporción y con la misma dureza, lo cual es de modo general cierto para otros productos de este tipo de mezclas [20].

### 5.2.6 Contenido de betún

El centro nacional para tecnologías asfálticas de los EE.UU (NCAT) ha llevado a cabo gran cantidad de ensayos en torno a mezclas asfálticas en lo que a EE.UU. se refiere, y establece que el contenido óptimo de betún puede determinarse mediante el proceso estándar usado para las mezclas convencionales sin que se añada el aditivo de mezcla semicaliente. Sin embargo, existen preocupaciones expresadas por otros autores, dado el hecho de que, debido a la mejor compactabilidad conseguida a la hora de aplicar estas mezclas, se podría llevar a cabo una disminución de medio punto porcentual en el contenido de betún óptimo para las mezclas WMA con respecto a las convencionales. Estas preocupaciones pueden resumirse en dos:

- Dada la menor temperatura de mezclado de las mezclas semicalientes, se produce una menor absorción de ligante por parte de los áridos [20], lo cual hace indicar que se necesita menor cantidad de betún.
- Ya que se produce una mejora de la compactabilidad en comparación con las mezclas convencionales, existe un menor número de huecos en la mezcla

semicaliente, lo que hace indicar que el contenido óptimo de betún en la mezcla debe ser menor [20].

Sin embargo, reducir el contenido óptimo de betún puede llevar a eliminar la mejor compactación resultante de la adición de estas tecnologías [8].

### 5.3 Modificación de la planta

A la hora de fabricar mezclas asfálticas, la planta de producción puede ser de dos tipos: continua o discontinua. En el caso de España, el tipo más popular es la planta discontinua, ampliamente usada e implantada. Debido a ello, en este apartado nos centraremos principalmente en las modificaciones a realizar en este tipo de planta. Para que las mezclas semicalientes resulten prácticas y ventajosas, en general deben utilizar las infraestructuras existentes, por lo que se van a describir aquellas modificaciones que deben realizarse en las plantas de fabricación de mezclas convencionales para adaptarlas a la producción de las semicalientes [1].

#### 5.3.1 Tecnologías basadas en la adición de productos

Muchas de las tecnologías WMA que hasta ahora hemos visto se encuentran basadas en la adición de algún tipo de compuesto o producto, de modo que la viscosidad de la mezcla cambie para poder reducir así la temperatura de producción [15]. En la mayoría de los casos, estos paquetes provistos por los productores o fabricantes son una combinación de sustancias reductoras de la viscosidad y aditivos químicos para mejorar la adhesión y la envuelta de los áridos. En otros casos existen recomendaciones acerca del uso específico del producto que aconsejan el uso adicional de aditivos químicos.

Existen numerosas maneras de introducir dichos aditivos en la mezcla. Por ejemplo, un caso común es la modificación del betún por parte del fabricante, resultando en el uso por parte de la planta de un betún listo para usar. Un segundo método consiste en el uso de algún tipo de tecnología de adición por parte de la planta. El aditivo se vende a la planta de forma separada del betún y se mezcla conjuntamente con el resto de la mezcla en la misma. Dentro de esta última forma de adición, dos procesos distintos se pueden distinguir: el método húmedo o el método seco.

La principal diferencia entre ambos es el sistema en el que se añade el aditivo en la planta. En el método húmedo, el aditivo se mezcla homogéneamente con el ligante y después se añade esta mezcla a los áridos en el tambor de mezclado. Por otro lado, en el método seco el aditivo se inyecta dentro de la línea de producción del asfalto justo antes o directamente en el tambor de mezclado, por lo que se mezcla con el resto de materiales una vez allí.

La elección de una tecnología concreta para añadir estos productos se debe realizar con vistas a conseguir la correcta calidad del producto. Dado que de modo general los aditivos suponen un porcentaje muy pequeño respecto del total de la masa de la mezcla, es importante que el mezclado se lleve a cabo de una manera homogénea. Si el tiempo de permanencia en el tambor de mezclado es relativamente corto, en algunos casos puede llevar a una insuficiencia en dicha homogeneidad, dando lugar a diferentes resultados insatisfactorios en el rendimiento de estas mezclas semicalientes. La modificación necesaria dependerá por tanto del tipo de planta del que se esté hablando, de la producción anual y de tecnologías de adición que ya se encuentren instaladas.

### 5.3.2 Equipos especiales para los procesos de espumación

La parte principal de cualquiera de los procesos de espumación que se han visto anteriormente es el sistema de adición de agua y/o el uso de boquillas de espumación. La mayoría de los fabricantes de tecnologías WMA basadas en la espumación ofrecen sus propios kits que pueden ser adaptados a cada caso particular de planta. Las boquillas de espumación se tienen que instalar en línea con sistema de adición del betún. Tienen que apoyarse además en un sistema de suministro de agua (tubería de agua, tanque propio) y un sistema de regulación de la misma. Aparte también es necesario en algunos casos la existencia de un lugar para que se produzca la expansión del betún. Estos procesos de adición de agua pueden controlarse desde una unidad específica sita en el centro de operaciones de la planta. Se debe prestar una especial atención a la posibilidad de cambiar entre la producción de mezclas semicalientes y mezclas convencionales. Otro problema importante es el mantenimiento de las boquillas, ya que pueden requerir tratamiento especial y/o limpieza entre cada uno de los lotes o después de cada tanda de producción.

### 5.3.3 Equipos para la dosificación de aditivos

- Aditivos líquidos: en la mayoría de los casos se necesita el uso de un vibrador, si es condición indispensable que el aditivo deba añadirse al tanque de betún. Los vibradores de bajo movimiento parecen ser adecuados. En otros casos puede necesitarse el uso de una bomba con medidor volumétrico preciso, de modo que se

tenga una idea exacta de la cantidad de aditivo introducida en línea con el betún o incluso dentro del tanque de almacenamiento.

- Aditivos en forma granular o de pastilla: El equipo que originariamente se utilizara para la adición de fibras puede de manera general realizar las funciones de adición de los aditivos WMA, si es que puede accederse al mismo en la planta. Si no existe tal equipo, se pueden usar alimentadores neumáticos o tolvas. En cualquier caso, el sistema de medición de la cantidad adicionada debe ser adecuado y preciso. Finalmente, la adición directa en la mezcladora de las plantas discontinuas es otra opción, si no se dispone de ningún mecanismo de apropiado.

#### 5.3.4 Mezclado

En algunos casos se ha notado [1], que el pequeño periodo de mezcla que se usa en las plantas para fabricar las mezclas convencionales puede resultar insuficiente para conseguir la anterior mencionada homogeneidad de los aditivos semicalientes cuando estos se añaden directamente a la mezcladora. En estos casos puede que sea necesario cambiar el proceso de mezclado para prolongar el tiempo en la mezcladora. Esto puede reducir la productividad de la planta asfáltica y añadir costes al proceso de producción.

## 6 PROPIEDADES, RENDIMIENTO Y COSTES COMPARATIVOS

A lo largo de esta sección se tratará de manera más o menos exhaustiva aquellos aspectos relacionados con las propiedades de las mezclas semicalientes, prestando especial atención a aquellos que influyen directamente en los costes de este tipo de asfaltos. Desde el punto de vista práctico, está claro que el modo más fiable de evaluar el rendimiento de una mezcla asfáltica es mediante los tramos de prueba. En EE.UU. este tipo de tramos están ampliamente extendidos, pero sin embargo en Europa, donde esta tecnología es más antigua, sólo en Alemania y Noruega se usan este tipo de ensayos de manera generalizada. Por este motivo, la mayoría de los resultados con los que se cuentan actualmente provienen de estudios de laboratorio, y de algún modo han sido ya discutidos y comentados anteriormente.

### 6.1 Rendimiento

En general, es posible afirmar que las secciones de carretera que hasta ahora se han construido usando tecnologías y productos WMA han exhibido hasta el momento un rendimiento igual, y en limitados casos superior, al de las mezclas convencionales [1,4,5,6,7,14,15]. Sin embargo estas secciones tienen un tiempo que no supera los 10 años en casi ningún caso (las primeras secciones de prueba fueron construidas a finales de los años 90 [4]), por lo que es más difícil establecer si realmente su rendimiento a largo



plazo es superior o igual al de las mezclas convencionales. En caso de que no fuese así, todas las ventajas que pudiese conllevar el uso de estas mezclas quedarían contrarrestadas por su falta de aplicación práctica, ya que no tendría sentido hablar de ahorro energético o menor daño ambiental si tenemos que estar sustituyendo el pavimento con una mayor frecuencia que las mezclas convencionales. Chowdhury establece [20], desde su experiencia, que aquellas secciones asfálticas que fallan antes del fin de su vida útil generalmente muestran signos de agotamiento antes de los 5 años posteriores a su construcción.

A pesar de lo anterior, es necesario tener en cuenta el hecho de que el envejecimiento a largo plazo debe ser investigado más profundamente, lo que puede sacar a la luz mayores diferencias entre las mezclas convencionales y las semicalientes, así como incluso diferencias entre las mismas tecnologías WMA [6]. La importancia del factor de envejecimiento a largo plazo radica en el hecho de que, al realizar estas mezclas a menor temperatura, el envejecimiento que se produce en el betún es bastante menor, con la consiguiente ventaja de que la vida útil del asfalto puede verse ampliada [4].

Además de ese aspecto, también necesita una más profunda investigación diferentes aspectos expresados por algunos autores como preocupante. Tales aspectos viene a ser: sensibilidad al agua, aumento de las deformaciones permanentes/roderas, necesidad de tiempo de cura de algunos de estos productos [14]. También hay que prestar especial atención a problemas que pueden aparecer como consecuencia de la menor temperatura de fabricación de estas mezclas. Así pues, el secado incompleto de los áridos, la pobre envuelta de éstos por parte del betún o la permanencia de agua que lleve a menor adherencia son factores que pueden afectar al rendimiento de estas mezclas. Muchos de ellos han sido ya investigados, y a día de hoy se encuentran posibles soluciones a los mismos [8].

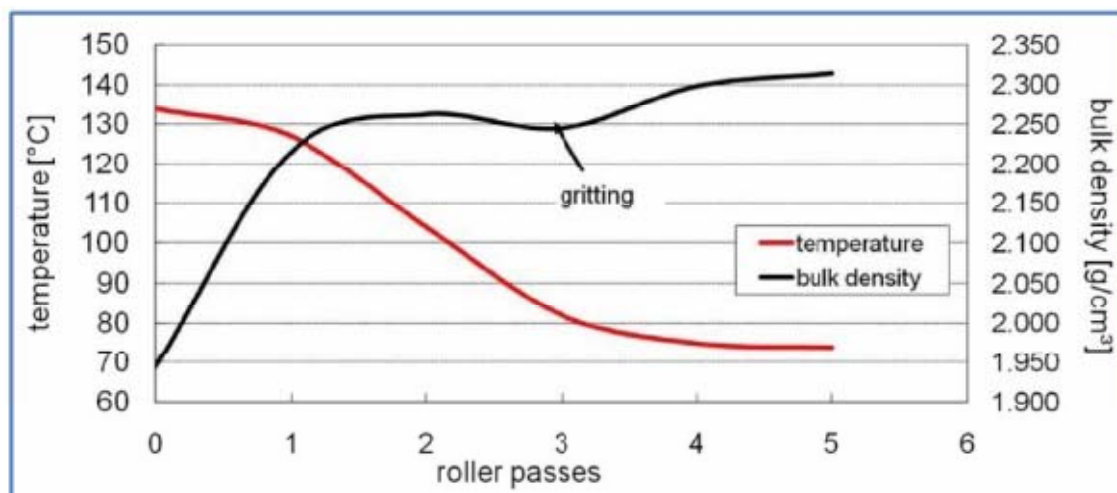
## 6.2 Propiedades

Para que podamos entender de una manera mejor el funcionamiento de estas mezclas y cuáles son sus puntos débiles, vamos a tratar en las siguientes subsecciones algunas de las propiedades que las caracterizan.

### 6.2.1 Compactabilidad

A la hora de estudiar la compactabilidad de una mezcla bituminosa en el laboratorio existen distintos métodos. En Europa, para las probetas cilíndricas, el más usado es el método Marshall, aunque también existen otros como el compactador giratorio o el compactador vibratorio. En los datos de compactación del documento 1 se indica que el compactador giratorio es insensible a los cambios de temperatura y por lo tanto no se puede usar para evaluar las WMA. Así mismo se afirma que el compactador Marshall o el vibratorio proveen resultados más fiables que simulan en mejor modo las condiciones de compactación a menores temperaturas.

En el caso de las mezclas semicalientes, de los resultados e investigaciones llevadas a cabo se extrae que tienen una mejor compactabilidad potencial dado el hecho de que su viscosidad es menor y el betún se encuentra menos envejecido debido al proceso de producción. Debido al hecho de que se puede conseguir una mayor compactación por cada pasada de rodillo en obra, pudiera ser que el número de pasadas necesarias para alcanzar la densidad aparente necesaria fuera menor, lo que supondría un ahorro de energía en la compactación y un aumento del periodo de tiempo disponible para la compactación, lo cuál puede ser especialmente importante a bajas temperaturas. Los riesgos asociados a una compactación reducida superan con creces los costes adicionales de la producción de



**Figura 17 - Aumento de la densidad conforme al número de pasadas del compactador. Fuente: Zamanis[1]**

mezclas semicalientes.

A partir de resultados de campo obtenidos en Alemania [1], se puede afirmar que por encima de su punto de fusión, las tecnologías WMA basadas en ceras permiten una compactación con menor esfuerzo y realizada a una menor temperatura. Después de una pasada del rodillo, se consiguió un grado del 96% de compactación, y con dos pasadas casi

la mayor densidad posible. En la imagen 17 se puede ver una gráfica que presenta esta información.

### 6.2.2 Curado

No existen estándares europeos que regulen el tema del curado en torno a las mezclas asfálticas. Sin embargo, la norma americana AASHTO si contempla dos procesos diferentes: uno de envejecimiento a corto plazo de la mezcla sin compactar (simula el periodo que pasa antes de la compactación de la mezcla) y otro de envejecimiento a largo plazo de la mezcla compactada (simula el envejecimiento que se produce durante la vida útil).

Las diferentes propiedades del betún, así como su distinta consistencia, de aquellos que se usan para la producción de mezclas semicalientes dan lugar a capacidad diferente de estas con respecto a las convencionales. Ya se ha visto anteriormente que la reducción de la viscosidad del betún a temperaturas de producción y compactación puede resultar en importantes cambios de rigidez de la mezcla en el corto plazo principalmente. Esto se puede convertir en un factor importante para ver cómo de rápido se puede reabrir al tráfico esa carretera, de modo que las roderas no sean un problema inmediato inmediatamente después de su construcción. La necesidad de un tiempo de curado puede ser también importante a la hora de evaluar estas mezclas en el laboratorio. Para aquellos productos que utilicen procesos de espumación para la producción de estas mezclas, es necesario permitir la disipación de la humedad antes de realizar los ensayos. El curado simularía de este modo el envejecimiento a corto plazo que se produce en el silo y en el transporte de estas mezclas. De este modo, mientras que para las mezclas convencionales no existen requisitos concernientes a un tiempo de curado, para la mayoría de WMA se aconseja al menos dos horas de curada a temperatura de compactación antes de los ensayos [1,20].

Por lo tanto, mientras que para las mezclas convencionales los resultados solo experimentaron cambios mínimos después del curado, el efecto en las mezclas semicalientes es bastante más obvio. Para evitar resultados imprecisos o engañosos, se recomienda someter a la mezclas a un periodo de curado corto antes de compactar los testigos de laboratorio [20,33]. Sin embargo, el modo de realizar este curado varía entre los distintos autores que recomiendan su uso. Perkins [33] aconseja realizar el curado de las mezclas semicalientes en un horno de corriente de aire a la temperatura de compactación durante dos horas, mientras que Chowdhury et al [20] establece que no existe necesidad de curado para Sasobit y Asphaltan B basado en los ensayos realizados,

pero sí para Evotherm, WAM-Foam y Aspha-Min, donde el curado ayudaría a expulsar la humedad residual que queda en la mezcla.

La determinación de las propiedades de curado para estas mezclas semicalientes es altamente importante de modo que sea posible predecir el rendimiento de las mismas en servicio y el tiempo que debe pasar para permitir la reapertura al tráfico rodado, sin que aumente la posibilidad de aparición de roderas y deformaciones. A partir de investigaciones [8,20] se establece que no hay necesidad de un mayor periodo de curado para permitir la apertura al tráfico en las WMA producidas con tecnologías Aspha-Min, Evotherm y Sasobit. Dado esta característica, una aplicación que se ha encontrado de Sasobit es su uso en pistas de aeropuertos. Así pues, en el aeropuerto de Frankfurt, tras su puesta en obra durante 7.5 horas durante la noche, se reabrió al tráfico aéreo a la temperatura de 85°C en la mañana [1].

### 6.2.3 Sensibilidad a la humedad

La sensibilidad a la humedad experimentada por las mezclas semicalientes puede convertirse en un problema muy importante. Si la humedad contenida en los agregados antes de mezclarlos con el betún no se evapora totalmente durante el mezclado debido a las menores temperaturas, el agua permanecerá retenida en los mismos lo que puede llevar a un incremento de la sensibilidad al daño por la misma. Esto es incluso más crítico para las tecnologías WMA que se producen usando procesos de espumación, debido a la humedad residual que pueden dejar atrás.

La normativa europea establece a través de la norma EN 12697-12 tres métodos para determinar la sensibilidad al agua. El más común es el índice de tracción indirecta, que se determina a partir de dos conjuntos iguales de probetas. Este ensayo mide la fuerza ejercida para la rotura, pero también la envuelta del árido y la fracturación de los mismos. De este modo es posible determinar la mala adhesión betún-áridos (fallo por adhesión) debido a la humedad. Otro método utilizado para medir indirectamente el daño a sensibilidad a la humedad de las mezclas bituminosas es el dispositivo Wheel Tracking de Hamburgo. Se trata de un test simulativo que permite determinar la resistencia del pavimento a deformaciones plásticas permanentes. De manera adicional, la sensibilidad al agua se mide como el punto de inflexión de la gráfica obtenida del ensayo. Corresponde al número de pasadas en la cual la deformación de la probeta es el resultado del daño por la humedad y no solo deformación plástica [1].

Una investigación importante llevada a cabo sobre este aspecto es la de Hurley and Prowell [8,12,32] en la que tratan principalmente con Aspha-Min, Sasobit y Evotherm. Para ello usaron el ensayo de tracción indirecta a diferentes temperaturas de compactación con áridos secados al horno. Los resultados que se obtuvieron mostraron que el uso de estos aditivos disminuía el índice de tracción indirecta en comparación con la mezcla de control convencional. Solo tres de las nueve probetas ensayadas cumplieron el requisito de la norma americana Superpave de 0.8 de ratio entre los índices de las muestras saturadas y las secas. Los peores resultados fueron siempre para Aspha-Min (tecnología basada en procesos de espumación por método indirecto), lo que se cree puede estar conectado con la espumación del betún a partir de la humedad liberada por la zeolita, causando fallo en la cohesividad. Posteriormente se midieron dichos índices con aditivos promotores de la adhesión en los productos Sasobit y Aspha-Min, pero no se presentaron los resultados esperados. En el caso de Aspha-Min, los resultados fueron incluso peores, lo que puede estar relacionado con la reducción de la viscosidad por parte del agente cohesivo. Para Sasobit los resultados fueron aceptables, pero la fuerza aplicada a las probetas se había reducido a la mitad que sin dicho agente.

De todo lo anterior se puede concluir que ensayo de la Wheel Tracking de Hamburgo puede convertirse en uno particularmente importante para la evaluación de las mezclas semicalientes, dado su carácter simulativo que permite directamente determinar el rendimiento de la mezcla sin tener mucha experiencia en el rendimiento real in situ. El beneficio de este método es que permite la evaluación de dos propiedades al mismo tiempo – deformaciones y sensibilidad al agua. El método ha demostrado ser sensible a factores importantes para las WMA – incluyendo la dureza del ligante, el envejecimiento a corto plazo, la temperatura de compactación y los tratamientos de adherencia. Actualmente, el método principal para determinar la resistencia a deformaciones permanentes es el ensayo Wheel Tracking, que se realiza al aire. Este estándar, sin embargo, permite determinar las deformaciones permanentes con un dispositivo menor de acuerdo al procedimiento B bajo agua. La introducción de este método para las mezclas semicalientes como un proceso normalizado para la evaluación de la sensibilidad al agua y de las deformaciones ayudaría a la implementación de estas mezclas con especificaciones de fallo aplicadas a los productores de carreteras.

#### 6.2.4 Rigidez de la mezcla

La rigidez de un pavimento depende tanto de las propiedades del betún como del esqueleto mineral, donde el ligante es el responsable de las propiedades visco-elásticas mientras que el esqueleto influye en las propiedades plásticas y elásticas. La proporción en la que cada una de estas partes influye viene determinada por la duración de la carga y la temperatura a la cuál este se produce. En laboratorio, la rigidez de la mezcla se mide

mediante distintos métodos, por ejemplo mediante el ensayo de flexión o carga en 4 puntos en probetas en forma de viga o ensayos uniaxiales y triaxiales en probetas cilíndricas.

Los componentes de la mezcla y su composición pueden ser extremadamente diversos, por lo resulta bastante difícil predecir las propiedades de una mezcla particular. De cualquier modo, está claro que uno de los factores claves que influye en la rigidez final de la mezcla es la rigidez del ligante. Esto supone un problema importante dadas las diferencias entre las mezclas convencionales y las semicalientes, ya que como se ha visto anteriormente la rigidez de las mezclas WMA se ve afectada por las diferentes temperaturas de producción y mezclado y posiblemente, por cambios en el diseño de la mezcla.

Por lo tanto la predicción del módulo de rigidez podría ser una herramienta útil para diseñar las mezclas semicalientes con respecto a qué rigidez de betún elegir, prediciendo la rigidez del pavimento y los posibles problemas que puedan aparecer concernientes a deformaciones permanentes, y sugiriendo posible ajustes en el espesor de las capas. Existen numerosos métodos para predecir dicha rigidez de las mezclas y que pueden servir para determinar las diferencias entre las mezclas HMA y las mezclas WMA, y ayudar a diseñar la mezcla eligiendo el betún correcto.

Hurley and Prowell [8,12,32] han llevado a cabo experimentos acerca del módulo de rigidez residual para productos WMA – Sasobit, Aspha-min y Evotherm – en diferentes rangos de temperaturas y con dos tipos de árido diferentes. Concluyeron que el uso de estos aditivos no cambia significativamente el valor del módulo residual y que el diseño del espesor de la mezcla no debería verse afectado por el uso de tecnologías semicalientes.

#### **6.2.5 Deformaciones permanentes**

Las deformaciones permanentes del pavimento (también conocidas como roderas) se forman durante la respuesta de baja rigidez del material, cuando la rigidez del betún es menor de 0.5 MPa [63]. Este comportamiento de rigidez viscosa ocurre en las mezclas asfálticas cuando las temperaturas son elevadas o cuando la aplicación de la carga se produce durante periodos largos y es mucho más complejo que el que se produce en la zona elástica. La rigidez en esta fase es función de múltiples parámetros, entre los que se encuentran: rigidez del betún, huecos en el árido, tipo, forma, macrotextura, microtextura

y estructura del árido, compactación (porcentaje de huecos, método de compactación,...), condiciones de confinamientos,...

La resistencia de las mezclas a deformaciones permanentes de acuerdo a la normativa europea debería determinarse con los siguientes métodos:

- Wheel tracking para mezclas asfálticas, SMA.
- Marshall test para mezclas en aeropuertos.
- Ensayos de compresión cíclica para mezclas asfálticas y asfalto mástico.

Los ensayos realizados usando el dispositivo Wheel Tracking de Hamburgo bajo agua mide la deformación y la sensibilidad al agua de un mezclas bituminosa mediante las pasadas de una rueda de acero (para las normativas EN debe ser de goma) a través de una superficie de pavimento que está sumergida en agua caliente. Las sensibilidades a deformación y a la humedad se determinan así pues usando este método. Otro método, más extendido en EE.UU., es el Asphalt Pavement Analyzer (APA). Mediante él, se pueden usar diferentes probetas, incluyendo aquellas cilíndricas realizadas con el compactador giratorio.

Existen preocupaciones expresadas ampliamente por los investigadores acerca del rendimiento ante deformaciones plásticas de las mezclas semicalientes. Estas preocupaciones están conectadas principalmente con la menor temperatura de mezclado, que puede llevar a un secado incompleto de los áridos y a una envuelta deficiente de mismos. Otro aspecto que puede influir en la disminución de esta resistencia es el menor envejecimiento del betún debido también a las menores temperaturas de producción y compactación. Visto esto, puede aumentar por tanto el potencial de deformaciones plásticas, lo que sugiere que tal vez deberían usarse betunes de grados más duros, como ya se ha comentado anteriormente. Para evaluar el impacto de estos problemas potenciales se han llevado a cabo multitud de investigaciones para determinar ensayos y test in situ que permitan vaticinar el comportamiento de las mezclas ante estas deformaciones.

Por ejemplo, la mayoría de los resultados de estas investigaciones permiten decir que en casi todos los casos Sasobit reduce la deformación. Además, Advera generalmente actúa peor [1]. Para otros aditivos los resultados obtenidos son variados. El buen rendimiento de Sasobit puede explicarse debido a la estructura enrejada que forma con el betún cuando se encuentra por debajo de su punto de cristalización. Este proceso endurece el ligante y aumenta la resistencia a deformaciones permanentes.

La investigación que ya hemos tratado anteriormente de Hurley and Prowell [1,12,32] también evaluó este parámetro para Sasobit, Aspha-Min y Evotherm, usando el ensayo APA ya comentado. Los resultados mostraron que el potencial de deformación aumentaba con la disminución de la temperatura de mezclado y compactación para todos los productos, incluyendo la mezcla patrón. Por lo tanto la reducción de resistencia a deformación puede estar relacionada más con el menor envejecimiento del ligante que con una tecnología en particular. Sin embargo, también en esta investigación las mezclas que contenían Sasobit presentaron una resistencia mejorada a deformaciones comparadas con otras mezclas.

### 6.2.6 Comportamiento a bajas temperaturas

El comportamiento a bajas temperaturas de las mezclas puede ser especialmente relevante para los países nórdicos con temperaturas invernales bajas. Por lo tanto, hay algunas consideraciones que deberían ser tenidas en cuenta concernientes a las mezclas semicalientes. A partir del documento [1] se puede afirmar que el uso de ceras Fischer-Tropsch (algo que podría aplicarse también al resto de ceras WMA) para el test del reómetro de viga a flexión aumenta la rigidez del betún y reduce las capacidades relajantes a bajas temperaturas (-24°C a -6°C). Así pues, la modificación provocada por las ceras lleva a empeoramiento del comportamiento a baja temperatura y se determina a partir del umbral establecido por el método SUPERPAVE que el concepto de Performance Grade (PG) del betún debería disminuirse en 2-3°C. Un problema similar lo experimentaron Hurley and Prowell [1,12,32].

## 6.3 Costes comparativos

Una vez vistas las propiedades que determinan el rendimiento de este tipo de mezclas, merece especial atención introducir una comparación entre los costes de producción que diferencian a las mezclas semicalientes de las convencionales. Está claro que estos costes englobarían numerosos factores, algunos de los cuales permanecerán inmutables para ambos tipos de mezclas. Nos centraremos principalmente en aquellos que representan una mayor diferencia.

Kristjansdottir et al. [6] señalaron que en algunas obras donde se midió el consumo energético, había generalmente una reducción de entre un 20 y un 75% en comparación con las mezclas convencionales, dependiendo de cuanto disminuía la temperatura de producción. Algo importante a tener en cuenta a la hora de hablar de los costes es que este



beneficio energético depende indudablemente del tipo de energía y el coste de la misma. Así pues, si el coste energético es alto, el beneficio será mayor. Si la energía proviene de materiales pétreos o de la electricidad, se requieren alrededor de 300.000 BTU<sup>1</sup> para producir una tonelada de mezcla convencional, lo que equivale más o menos a 7,6-11,4 litros de gasolina o diesel o de 2.5 a 3.5 termias de gas natural [20].

La tabla 4 muestras los costes generales de producir una mezcla convencional y los ahorros estimados al usar mezclas semicalientes basados en costes locales de energía [6,20]. Los costes para plantas específicas o para áridos concretos (p.ej. contenido en humedad de los áridos) varían.

Localización	Islandia	Honolulu, Hawai	Joliet, Illinois
Fuente de energía	Gasolina	Diesel	Gas natural
Cantidad para producir 1 tonelada de mezcla convencional	7.6 – 11.4 litros	7.6 – 11.4 litros	2.5 – 3.5 termias
Coste del carburante	0.66 \$/litro	0.58 – 0.79 \$/litro	0.70 – 0.80 \$/termia
Coste de producir 1 tonelada de mezcla convencional	5.00-7.00 \$	4.40-9.00 \$	1.75-2.80 \$
Electricidad necesaria para producir 1 tonelada de mezcla caliente	8-14 KWh	8-14 KWh	8-14 KWh
Coste eléctrico	0.02 \$/KWh	0.1805 \$/KWh	0.0445 \$/KWh
Coste eléctrico para producir 1 tonelada de mezcla caliente	0.16-0.28 \$	1.44-2.53 \$	0.36-0.64 \$
Coste energético total para producir 1 tonelada de mezcla caliente	5.16-7.78 \$	5.84-11.53 \$	2.11-3.44 \$
20% ahorro con WMA	1.00-1.50 \$	0.88-1.88 \$	0.36-0.56 \$
50% ahorro con WMA	2.50-3.75 \$	2.20 – 4.50\$	0.88 – 1.40\$

**Tabla 4 - Costes de producción de mezclas convencionales y ahorros para las WMA según localizaciones. Fuente: 6,20**

<sup>1</sup> La **BTU** o **BTu** es una unidad de energía inglesa. Es la abreviatura de *British Thermal Unit*. Se usa principalmente en los Estados Unidos. Equivale aproximadamente a 252 calorías. Una BTU representa la cantidad de energía que se requiere para elevar en un grado Fahrenheit la temperatura de una libra de agua en condiciones atmosféricas normales. [Fuente: Wikipedia]

Sin embargo, el uso de productos para mezclas semicalientes también aumenta los costes asociados a distintos aspectos de estas tecnologías. Kristjansdottir et al. (2007) [6] tabularon una serie de costes (Tabla 5) para algunos de los productos líderes en este mercado. Añadió que el objetivo de esta tabla no es comparar las distintas tecnologías, sino destacar que el uso de mezclas semicalientes lleva consigo una serie de costes que deben ser superados por el ahorro que se produce. Dado que estas tecnologías son nuevas, sus costes fluctúan y fluctuarán, y con el aumento del uso probablemente disminuirán con el tiempo. Según Chowdhury [20], WAM-Foam requiere modificaciones de planta para acomodar el proceso de espumación, lo que se estima conlleva un coste de 50.000\$ a 70.000\$. El coste aproximado de modificación de planta para Double Barrel Green se estima en 75.000\$ y sin que este precio incluya otros materiales. Aproximadamente la reducción de temperatura es de 30°C. Así pues, el ahorro comparado con las mezclas convencionales dependerá en su mayor parte en el coste base del combustible. Dado el actual coste elevado de la energía, el periodo de recuperación de la inversión será menor.

Tecnología WMA	WAM Foam	Aspha-Min	Sasobit	Evotherm
Modificación de los equipos o costes de instalación	30.000\$ - 70.000\$	0\$ - 40.000\$	0\$ - 40.000\$	mínimos
Royalties	15.000 \$ primer año 5.000\$ planta/año 0.30\$ /tonelada	Ningunos	Ningunos	Ningunos
Costes del material	N/A	0.60\$/lb	0.80\$/lb	7-10% más que el ligante
Dosificación recomendada	N/A	0.3% por masa de la mezcla	1.5-3% por masa de ligante	Usar en lugar del ligante
Coste aproximado por tonelada de mezcla	0.30\$	0.60\$	1.30-2.60\$	3.50-4.00\$

**Tabla 5. Costes de varias tecnologías WMA. Fuente: [6,20]**

Por otro lado, existen otras tecnologías, tales como REVIX o Rediset que no requieren modificaciones en la planta. En algunos casos sí que requieren pequeñas modificaciones para adicionar los productos al ligante líquido en la planta. Comparado con las convencionales, el coste adicional de este tipo de tecnologías depende principalmente del

coste de los productos. Los contratistas generalmente perciben riesgos antes los procesos y tecnologías nuevos y, como resultado, aumentan los precios de contratación. Kristjansdottir et al. (2007) [6] sugiere que los riesgos asociados con las mezclas semicalientes puede de manera general clasificarse en rendimiento a largo plazo e incerteza. Las tecnologías WMA son relativamente nuevas, teniendo las más antiguas no más de 15 años y con menos de 8 en Norteamérica. Mientras que el rendimiento ha sido por lo general satisfactorio, es necesaria una mayor cantidad de investigación acerca de la equivalencia en vida útil y rendimiento de las mezclas semicalientes con respecto a las convencionales

## **7 BENEFICIOS, DESVENTAJAS y POSIBLES CAMPOS DE ESPECIALIZACIÓN DE LAS MEZCLAS SEMICALIENTES**

La principal característica en torno a la que gira la innovación introducida por estas mezclas es la reducción de temperatura conseguido durante el proceso productivo y de extendido. Pero estos métodos son realmente innovadores dados los beneficios que traen consigo, que abarcan distintos campos. A lo largo de este apartado se van a intentar clarificar cada una de estas ventajas, de modo que quede claro el auténtico avance y ahorro que suponen estas mezclas asfálticas. Sin embargo, como ya se ha esbozado en algunos de los apartados anteriores, no todo son ventajas a la hora de hablar de WMA. También suponen un riesgo dada su temprana edad, y aparecen una serie de dudas o problemas que, en caso de confirmarse y mantenerse, supondrían una serie de desventajas importantes.

### **7.1 Beneficios potenciales de las mezclas semicalientes**

Las mezclas semicalientes prometen una serie de beneficios como consecuencia de su uso. Qué beneficios específicos y qué grado de importancia tienen dependerán del tipo de tecnología usada, así como del producto en concreto. Conforme a la mayoría de los autores consultados **[1,4,5,6,20,34]**, los beneficios que conlleva el uso de tecnologías WMA pueden agruparse del siguiente modo:

- Beneficios ambientales y de emisiones
- Beneficios económicos
- Beneficios de producción
- Beneficios de extendido/compactación

Dado que cada uno de ellos cuenta con peso y entidad propios, vamos a analizarlos más profundamente.

#### **7.1.1 Beneficios ambientales y de emisiones**

Datos sacados el foro del betún **[15]** relacionan las emisiones con la temperatura: “A temperaturas inferiores a los 80°C, virtualmente no existen emisiones; incluso alrededor

de los 150°C, las emisiones son solo de alrededor de 1mg/h. Sin embargo, a 180°C, las emisiones sí resultaron ser bastante importantes.”

Según Kristjansdottir [6], a partir de las mediciones realizadas por él y por su equipo, queda claro que las emisiones de humos durante la producción de mezclas semicalientes se ven claramente reducidas comparadas con el proceso productivo de las mezclas convencionales. En general, aquellos parámetros que se midieron variaron entre un 20 y un 70% de reducción respecto a las HMA. Jenkins et al. [10] afirman que con el proceso WAM-Foam se puede conseguir una reducción de en torno al 40% en el consumo energético durante el proceso productivo, mientras que Barthel y De Vivere [4], usando Aspha-Min, midieron un 30% de reducción de dicho consumo, dada la menor temperatura (entre 30 y 40°C menos que con las mezclas convencionales) y un 75% de reducción en la emisión de humos debido a los 35°C menos de temperatura. Algunos datos presentados por diversos autores se recogen en la tabla 6.

	Vaitkus et al. [13]	Bueche, N. [17]	Larson et al.	D'Angelo et al. [5]	Evotherm website [54]
<b>CO<sub>2</sub></b>	30-40%	30-40%	31%	15-40%	46%
<b>SO<sub>2</sub></b>	35%	-	-	20-35%	81%
<b>VOC</b>	50%	50%	-	>50%	30%
<b>CO</b>	10-30%	-	29%	10-30%	63%
<b>NO<sub>x</sub></b>	60-70%	-	62%	60-70%	58%
<b>Dust</b>	20-25%	-	-	25-55%	-

**Tabla 6 - Tabla en la que se recogen valores de emisiones para distintas investigaciones. Fuente: elaboración propia**

Para aquellos proyectos de pavimentación que no tengan lugar al aire libre, la importancia de las emisiones de gases y humos se multiplica. Así pues, en el caso concreto de los túneles, la exposición de los trabajadores a humos es mucho mayor, y por lo tanto las reducciones que se consiguen usando las mezclas semicalientes pueden tener mayor impacto [19]. Estudios publicados por el National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) de los EE.UU. en 2000 indicaron cambios significativos en las funciones pulmonares de 1 de cada 44 trabajadores relacionados con la pavimentación de mezclas al

aire libre. Por el contrario, 3 de cada 9 relacionados con las mezclas y su pavimentación en lugares cerrados veían afectadas dichas funciones [6].



**Figura 18 - Diferencia de humos entre una mezclas convencional y otra semicaliente. Fuente: warmmixasphalt.org**

Aparte de todo lo anteriormente dicho, es bastante claro que la importancia que supone la menor emisión de gases perjudiciales para el medio ambiente irá directamente relacionada con la preocupación ambiental de la sociedad, así como con las regulaciones y normativas al respecto introducidas por cada país. En aquellos lugares donde ambos aspectos se vuelvan más estrictos e importantes, cómo es el caso de los países participantes en el protocolo de Kyoto, la reducción de emisiones será un beneficio con bastante peso. Dentro de

cada país, es probable que estas emisiones reducidas impulsen el uso de mezclas semicalientes en aquellas zonas donde la densidad de población sea elevada, y teniendo en cuenta lo anterior, también en aquellas zonas donde se pavimente en lugares cerrados. Sin embargo, mientras no se endurezca la normativa acerca de los humos y emisiones, no existirán incentivos especiales para los productores de estas mezclas. Así pues, si no hay un beneficio económico relacionado con estas mezclas, su verdadera importancia será relativa en la práctica [5,6,20].

Por lo tanto, se puede concluir que dadas las menores temperaturas de producción de las mezclas semicalientes y templadas, el consumo de combustible y energía que se produce es bastante menor. Como consecuencia de este hecho, la emisión de gases, humos y olores también disminuye, como son los gases invernadero y el CO<sub>2</sub>. Estas reducciones tienen un impacto directo tanto en la protección del medio ambiente, como en la mejora de las condiciones de trabajo de aquellas personas que se dedican al mundo de las mezclas asfálticas [4].

### 7.1.2 Beneficios económicos

La reducción que se produce en el consumo energético como consecuencia del uso de las mezclas semicalientes es otros de los beneficios del que se habla ampliamente en la bibliografía consultada. Es casi unánime que estas mezclas provocan un menor consumo, y

en aquellas obras donde se midió en comparación con las mezclas convencionales, disminuciones del 20-40% se alcanzaron, dependiendo de cómo de grande era la producción [6]. Estos porcentajes pueden ser aún mayores en mezclas usando Low Energy Asphalt o LEAB, donde parte de los áridos no son calentados por encima del punto de ebullición de agua [5].

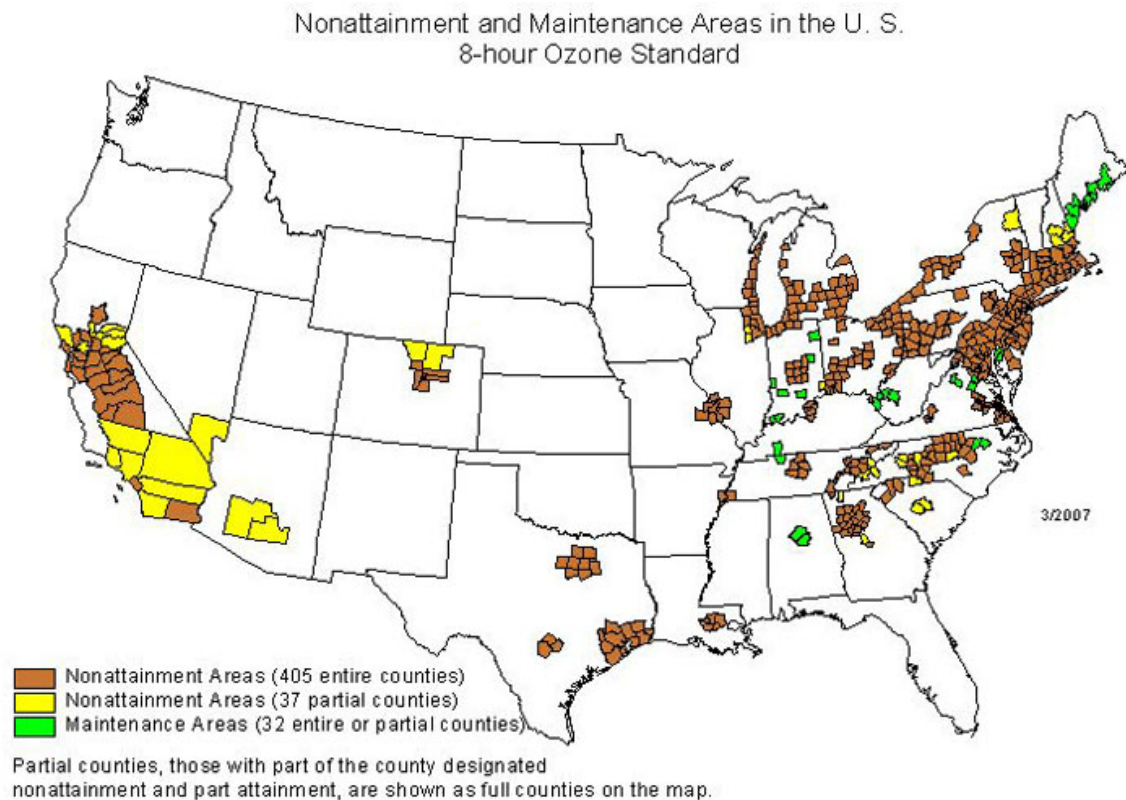
La importancia de este beneficio radica principalmente en el tipo de energía que utilice en el proceso de producción y cómo de contaminante y cara es esta [4]. En la mayoría de los países el coste de la energía es relativamente elevado y por lo tanto este beneficio puede tener una importancia grande de cara al productor. En aquellos países donde las fuentes de energía son renovables o relativamente baratas, este beneficio cobra menor importancia. También es importante tener en cuenta que existen una serie de costes adicionales para las plantas a la hora de producir las mezclas semicalientes, como por ejemplo son el coste de los aditivos, las patentes, las modificaciones de la planta,... Estos costes han sido estudiados en el capítulo 6.

Un beneficio secundario comentado por algunos autores es el hecho de que las menores temperaturas de producción pueden resultar en un menor desgaste de la planta asfáltica [6].

### 7.1.3 Beneficios de producción

En el caso de las mezclas semicalientes, quizás los beneficios productivos sean los menos importantes. Principalmente, la ventaja relacionada con el producción es la posibilidad de incluir mayores porcentajes de asfalto reciclado (Reclaimed Asphalt Pavement - RAP). Debido al aumento de la trabajabilidad que se produce en estas mezclas como consecuencia de la menor viscosidad y del menor envejecimiento del ligante, se contrarresta la rigidez que el uso de RAP provoca en las mezclas que lo incluyen [35]. Algunos autores [5,13] coinciden en afirmar que porcentajes de RAP superiores al 50% pueden añadirse a las mezclas.

Varios estudios han concluido que la posibilidad de un uso mayor de asfalto reciclado en las mezclas convencionales puede ayudar a superar los costes iniciales aumentados, conservar los recursos naturales y evitar problemas de eliminación. Además de esto, las propiedades del



**Figura 19 - Mapa de los EE.UU. con las zonas con emisiones restringidas de ozono. Fuente: google.com**

asfalto reciclado correctamente diseñado han demostrado ser comparables a aquellas que poseen los asfaltos de nueva producción [1].

Además de esta ventaja, el menor envejecimiento que se produce en el ligante es también un factor a tener en cuenta [4]. Debido a ello se cree que se puede producir una mejora en la vida útil de los pavimentos, pero debido a que las investigaciones en torno a este aspecto son bastante novedosas, de momento no se ha demostrado. Finalmente, otro beneficio en este campo, que está directamente relacionado con la reducción de la emisión de humos, es la posibilidad de situar plantas asfálticas cerca de áreas urbanas, con el correspondiente ahorro en transporte [6].

#### 7.1.4 Beneficios de pavimentación

Los beneficios de pavimentación conseguidos por el uso de estas mezclas están relacionados con el efecto modificador de la viscosidad que provocan. Como resultado, se producen importantes mejoras en la trabajabilidad de las mismas y la compactación puede realizarse con menor esfuerzo. Numerosos estudios han demostrado mediante datos que



las tecnologías semicalientes actúan como promotores de la compactación y reducen el esfuerzo compactador requerido [7].

Otra ventaja que cae dentro de este campo es la posibilidad de pavimentar aún en climas de temperaturas bajas. Este beneficio aparece debido a la menor diferencia de temperatura entre las mezclas y el ambiente, lo que cause una caída menos dramática del calor de la mezcla [4]. Esto permite un mayor periodo de tiempo para pavimentar y compactar, y extiende la temporada durante la cual se puede llevar a cabo la pavimentación. Con esta ventaja, son también posibles mayores distancias de transporte de las mezclas. De este modo, las plantas pueden estar situadas en lugares más lejanos a las obras, haciendo posible la pavimentación en aquellas zonas acogidas a restricciones en las emisiones [5].

Además, con la menor diferencia de temperatura entre mezcla y ambiente, la construcción y apertura al tráfico puede ser más breve, lo que es perfecto en algunas situaciones complicadas, tales como rehabilitaciones de aeropuertos, autovías especialmente transitadas, etc. [34]

## 7.2 Inconvenientes

Como ya se ha dicho para el caso de los beneficios, cada tipo de tecnología y cada producto específico deberían ser tratados separadamente, ya que cada uno de ellos tiene sus puntos flacos. Sin embargo, en este apartado se va a intentar reunir de nuevo todos los productos en un único grupo, destacando sus principales desventajas. Mientras que hay grandes promesas en torno al uso de estas mezclas y sus menores temperaturas de producción y extendido, también existen preocupaciones, principalmente relacionadas con el rendimiento e implementación de las mismas, especialmente sobre especificaciones y control de la calidad. Así pues, más investigación se hace necesaria en una serie de campos que van a ser analizados a continuación.

### 7.2.1 Deformaciones permanentes (rutting)

Tanto como el menor envejecimiento del ligante durante el proceso productivo (debido principalmente a las menores temperaturas de trabajo), tanto como el aumento de la sensibilidad a la humedad de estas mezclas se traducen en un incremento de la posibilidad

de formación de deformaciones plásticas en el pavimento, generalmente conocidas como roderas. Se cree que la principal tendencia es la formación de las mismas al principio de la vida del pavimento, ya que con el paso del tiempo el betún va envejeciéndose y endureciéndose, siendo menos probables dichas formaciones [1].

### 7.2.2 Costes económicos

Aunque de entrada el uso de estas mezclas promete traer importantes ahorros energéticos que se traducen en menor gasto, existen costes iniciales, que unidos a posibles royalties, pueden resultar en un importante inconveniente para los contratistas, que no van a usar estas tecnologías únicamente por el resto de beneficios (a no ser que se apliquen regulaciones acerca de emisiones más estrictas)[6].

Por lo tanto, teniendo en cuenta aspectos económicos, los costes iniciales pueden suponer una barrera importante, pero también otros costes, como aquellos denominados recurrentes o royalties, tienen que ser tenidos en cuenta. Los costes iniciales varían dependiendo de la tecnología usada. El uso de tecnologías WMA requiere aditivos, un coste recurrente, y/o modificaciones de la planta asfáltica, lo que requiere inversión de capital. Con vistas al futuro, estas tecnologías pueden traer importantes ahorros si se consigue un mayor rendimiento a largo plazo de las mezclas como resultado del menor envejecimiento del ligante durante la producción; sin embargo, esto aún no se ha demostrado dado el corto tiempo en el que estas mezclas han sido usadas [33].

### 7.2.3 Sensibilidad a la humedad/agua

Las menores temperaturas de producción usadas en las mezclas semicalientes pueden aumentar el daño potencial debido a la humedad. Parece haber dos causas principales para que se produzca este problema. Primero, temperaturas más bajas de producción y compactación pueden resultar en un secado incompleto de los áridos [8]. Para prevenir esta sensibilidad al agua se debe realizar pues un diseño de la mezcla apropiado. De los muchos modos que hay de prevenir la remoción en los pavimentos, el uso de agente anti-striping (ASAs) es el método más común. Uno que se utiliza muy a menudo es la cal. Basados en investigaciones y experiencias anteriores, es razonable creer que añadiendo agente apropiados de efecto anti-striping se puede aliviar el problema [34].

La segunda causa que puede producir sensibilidad al agua es el uso de los mencionados ASAs. Cuando estos agentes son mezclados con el ligante y posteriormente con el árido y aditivo que introduce agua, se pueden producir algunas reacciones químicas entre los ASAs y los aditivos, debido a las altas temperaturas a las que se produce el mezclado (110°C), y que pueden resultar en una pérdida de adhesión en la mezcla [36]. No existen muchas investigaciones llevadas a cabo en esta área, es decir, en determinar los efectos de ASAs líquidos con aditivos WMA, que como hemos dicho puede llevar a daño por humedad y a un posterior fallo del pavimento.

#### 7.2.4 Rendimiento a largo plazo

En un ciclo de vida útil de un pavimento, si las mezclas semicalientes no tienen un rendimiento similar o mejor que las mezclas convencionales, no se puede hablar de beneficios ambientales a largo plazo o de ahorros energéticos [5]. Debido a la relativa novedad que suponen estos productos, los ensayos de campo o in situ son limitados en número, y también tiene un periodo de vida corto (siete años en EE.UU. y poco más de 10 años en algunos países europeos). Por este motivo, no es aceptable actualmente hablar de rendimiento a largo plazo. Hasta la fecha, en EE.UU. no se han notado importantes efectos negativos en el rendimiento a largo plazo [20], y en Europa las secciones de ensayo de mezcla semicaliente han tenido un comportamiento igual o mejor que las convencionales [5]. Es importante destacar que mientras que EE.UU. la mayoría de los ensayos han sido llevados a cabo por organismos públicos (DoTs – Departments of Transport), en Europa las compañías privadas que comercializan los productos son las responsable de estas investigaciones, lo cual, en algún modo significa una revisión menos independiente de las diferentes tecnologías semicalientes.

## 8 Posibles especializaciones

En un principio, no existen como ya hemos visto ningún tipo de limitaciones para la producción y uso de mezclas asfálticas semicalientes y estas tecnologías pueden usarse para las mismas composiciones que las convencionales. Sin embargo, las tecnologías WMA prometen una serie de beneficios que ya se han explicado anteriormente. Estas ventajas sobre las mezclas calientes tradicionales pueden ser usadas en algunas circunstancias específicas de pavimentación y producción y permiten que las mezclas semicalientes no sean solo un sustituto de las mezclas convencionales, sino que también sean útiles para circunstancias donde estas no puedan ser utilizadas. A continuación se presenta una lista de posibles aplicaciones específicas de estas mezclas:

- Aumento del porcentaje de asfalto reciclado: dada la menor viscosidad del ligante en condiciones de trabajo, las mezclas semicalientes pueden contener un mayor porcentaje de RAP que el que contienen usualmente, manteniendo el

mismo grado de trabajabilidad. En Alemania se han llevado a cabo ensayos con porcentajes de RAP del 90 al 100%; en estos casos se usaron Aspha-Min y Sasobit [5].

- Situación de plantas en lugares urbanos: la producción de mezclas semicalientes puede permitir que sea más fácil introducir las plantas asfálticas en las áreas urbanas, dada la menor producción de humos y emisiones.
- Tiempos de construcción y apertura menores: debido al menor enfriamiento necesario para estas mezclas, es posible que tanto la construcción de las carreteras, como la apertura de las mismas al tráfico sean más breves. Esto puede ser de especial utilidad en aeropuertos (ya se ha realizado en el aeropuerto de Frankfurt [34]) y en carreteras con elevado índices de uso.
- Pavimentación en tiempos fríos: a través de la reducción de la viscosidad del ligante, las mezclas semicalientes pueden ser compactadas a menores temperaturas consiguiendo la misma densidad que las HMA y, dado que la diferencia de temperatura entre la mezcla y el ambiente es menor que para las convencionales, la ventana en la cual se puede realizar la compactación es mayor.
- Acceso a áreas de emisiones restringidas: de manera similar a la pavimentación en tiempo frío, mayores distancias de transporte son posibles debido a que las mezclas pueden ser compactadas a menores temperaturas. Por lo tanto, produciendo las mezclas semicalientes a la misma temperatura que las convencionales puede servir para abastecer lugares más distantes sin perder trabajabilidad. Esto significa mayores áreas de mercado y disminución de los costes de movilización y accesibilidad a grandes áreas urbanas. Según D'Angelo et al. [5], WAM-Foam fue almacenado en un silo durante 48 horas y tenía aún las propiedades necesarias para extenderlo y compactarlo a un nivel normal. Datos similares [60] se han obtenido para el Low Energy Asphalt (LEA). Éste fue mantenido en camiones a una temperatura de 70-90°C durante 5-6 horas sin que posteriormente se experimentasen problemas para compactarlo.

## 9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las mezclas semicalientes representan una oportunidad para la industria asfáltica de mejorar el rendimiento de sus productos, la eficiencia constructiva de los mismos, y seguir los pasos de la vanguardia medioambiental. Se distinguen de otras mezclas asfálticas

debido a los regímenes de temperaturas en los que se producen, así como por la durabilidad del producto final. Existen estudios que han demostrado el hecho de que el rendimiento de estas mezclas es comparable, e incluso en ocasiones superior, a aquél experimentado usualmente por las mezclas convencionales. Esto se consigue gracias a la mejor trabajabilidad, lo que conlleva al mismo tiempo una mejor compactación de la mezcla.

Aunque la existencia de estas mezclas no es completamente nueva (los procesos de espumación se remontan a los años 60), sin embargo sí que existen nuevas tecnologías importantes que necesitan ser tenidas en cuenta e investigadas.

Las menores temperaturas de producción, extendido y compactación también reducen el envejecimiento experimentado por el betún, lo que se cree que resulta en una mejorada resistencia a largo plazo. Todos estos factores traen consigo una serie de beneficios que afectan a aspectos tales como el medio ambiente (menores emisiones), las operaciones de pavimentación (mejor compactabilidad), la salud de los trabajadores asfálticos (menor exposición a humos dañinos) o la economía de producción (menor consumo energético). Estas ventajas deberían saltar a la opinión pública, de modo que políticos, estamento reguladores y normalizadores y sociedad en general tengan en cuenta las ventajas que supone el uso de las mezclas semicalientes.

Mientras que existen grandes promesas y esperanzas en torno al uso de estas mezclas debido a las menores temperaturas usadas en el proceso, aparecen también una serie de dudas, problemas o incertidumbres. Por lo tanto, es necesaria una mayor investigación en aspectos tales como: diseño de la mezcla, rendimiento a largo plazo, relación coste/beneficio, sensibilidad al agua. Asegurarse de que el rendimiento global de las mezclas semicalientes es realmente tan satisfactorio como el de las convencionales es un reto que debe tenerse en mente. En un ciclo de vida útil, no resulta lógico hablar de beneficios ambientales a largo plazo o ahorros energéticos, si en general las mezclas semicalientes rinden peor de lo esperado. En el futuro, será necesario pues más datos para apoyar el buen rendimiento y la durabilidad mejorada, basados en las experiencias y proyectos que están realizados, pero que aún no cuentan con el tiempo suficiente.

Finalmente, sería así mismo recomendable incluir las tecnologías WMA en las especificaciones y normativas nacionales e internacionales, de manera que se estimule a la industria asfáltica para proveer a la sociedad soluciones vanguardistas, especialmente en aquellos aspectos que conciernen a problemas ecológicos. El objetivo a seguir es realizar exhaustivas investigaciones y estudios, de manera que sea posible implementar esta nueva

tecnología de la manera menos restrictiva posible, animando de ese modo a la innovación y competitividad.

## 10 BIBLIOGRAFÍA

- [1] **Zaumanis, M.** (2010). *Warm Mix Asphalt Investigation*. Master of Science Thesis.
- [2] **Newcomb D.** (2007). *An introduction to Warm Mix Asphalt*. National Asphalt Pavement Association.
- [3] **Von Devivere, M.; Barthel, W.; Marchand, J.P. O.** *Warm Asphalt Mixes by adding Aspha-Min®, a synthetic zeolite*. Eurovia GmbH – [www.aspha-min.com/Downloads](http://www.aspha-min.com/Downloads)
- [4] **European Asphalt Pavement Association.** (2010). *The use of Warm Mix Asphalt*. EAPA position paper The use of Warm Mix Asphalt – January 2010.
- [5] **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.; Yeaton B.** (2007). *Warm-Mix Asphalt: European Practice*. European Tour FHWA. American Trade Initiatives.
- [6] **Kristjansdottir O.** (2006). *Warm Mix Asphalt for Cold Weather Paving*. Master of Science Thesis. University of Washington.
- [7] **Al-Rawashdeh A.S.** (2008). *Performance Assessment of Warm Mix Asphalt (WMA) Pavements*. A Master of Science Thesis. Rus College of Engineering and Technology. Ohio University.
- [8] **Hurley, G.C.; Prowell, B.D.** (2005). *Evaluation of Aspha-Min® Zeolite for use in warm mix asphalt*. Auburn: National Center for Asphalt Technology. Report 05-04.
- [9] **Muthen K.M.** (1998). *Foamed Asphalt Mixes: Mix Design Process*. Contract report. SABITA Ltd & CSIR Transportek.
- [10] **Jenkins K.J.; de Groot J.L.A.; van de Ven M.F.C.; Molenaar A.A.A.** (1999). *Half-warm foamed bitumen treatment, a new process*. 7<sup>th</sup> Conference on asphalt pavements for Southern Africa.
- [11] **Larsen O.R.** (2001). *Warm Asphalt Mix with Foam – WAMFoam*. Kolo Veidekke.
- [12] **Hurley, G.C. and Browell, B.D.** (2005). *Evaluation of Sasobit for use in warm mix asphalt*. Auburn: National Center for Asphalt Technology. Report 05-06.
- [13] **Vaitkus A.; Čygas A.; Laurinavičius A; Perveneckas Z.** (2009). *Analysis and evaluation of possibilities for the use of Warm Mix Asphalt in Lithuania*. The

Baltic Journal of Road and Bridge Engineering. Vilnius Gediminas Technical University.

- [14] **Bueche N.** (). *Warm Asphalt Bituminous Mixtures with regards to energy, emissions and performance*. Laboratoire des Voies de Circulation (LAVOC), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL). Road Transport Conference. Session 8.
- [15] **German Asphalt Paving Association.** (2009). *Warm Mix Asphalts*. Elke Schlüter communication agency, Alfter.
- [16] **Fitts G.L.** (). *Warm Mix Asphalt*. Asphalt Institute Conference, Texas.
- [17] **Butz T.** (). *Warm Asphalt Mix – Technologies, Research and Experience*. Sasol Wax GmbH.
- [18] **Smith A.** (2007). *Advera WMA Zeolite. WMA Technical Working Group*. Presentation at December 12, 2007.
- [19] **Jones W. (2004).** *Warm Mix Asphalt Pavements: Technology of the future?*. Asphalt Institute Magazine.
- [20] **Chowdhury, A.; Button, J.W.** (2008). *A review of warm mix asphalt*. Texas Transportation Institute – Technical Report.
- [21] **Corrigan, M.** (2005). *Warm mix asphalt technology*. Aashto standing committee on highways technical meeting.
- [22] **Asphalt Innovations** (). *Evotherm Warm Mix Asphalt Technology*. Presentation of MeadWestvaco Business.
- [23] **Logaraj S.; Almeida A.** (). *Surface-active bitumen additive for warm mix asphalt with adhesion promoting properties*. Akzo Nobel. Surface Chemistry LLC.
- [24] **Akzo Nobel** (). *Rediset Warm Mix Solutions*. Presentation.
- [25] **Smith, J.V.** (1984). *Definition of a zeolite*. ZEOLITES, 1984, Vol. 4, October, pp. 309-310
- [26] **Englert A.H., Rubio J.** (2004). *Characterization and environmental application of a Chilean natural zeolite*. International Journal of Mineral Processing.
- [27] **Ghobarkar H., Schiif G. and Guth U.** (1999). *Zeolites – From kitchen to space*. Prog. Solid St. Chem. Vol. 27, pp. 29-73, 1999
- [28] **Olguín, M.T.** (). *Zeolitas: Características y propiedades*. Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Depto. de Química. México
- [29] **Shang L.; Wang S.; Zhang Y.; Zhang Y.** (2010). *Pyrolyzed wax from recycled cross-linked polyethylene as warm mix asphalt (WMA) additive for SBS modified asphalt*. Article in press. Construction and Building Materials xxx (2010) xxx–xxx.
- [30] **Hurley, G.C. and Browell, B.D.** (2005). *Evaluation of potential processes for use in Warm Mix Asphalt*. Auburn: National Center for Asphalt Technology.
- [31] **Button J.W., Estakhri C., Wimsatt A.** (2007). *A synthesis of Warm-Mix Asphalt*. Texas Transportation Institute. Technical Report.



- [32] **Hurley, G.C.; Prowell, B.D.** (2006). *Evaluation of Evotherm for use in warm mix asphalt*. Auburn: National Center for Asphalt Technology. Report 06-02.
- [33] **Diefenderfer, S.; Hearon, A.** (2008). *Laboratory evaluation of a warm asphalt technology for use in Virginia*. Virginia department of transportation – Federal Highway Administration.
- [34] **Su, K.; Maekawa, R.; Hachiya, Y.** (2009). *Laboratory evaluation of WMA mixture for use in airport pavement rehabilitation*. Construction and Building Materials 23 (2009);2709-2714.
- [35] **Brown, D.C.** (2008). *Warm Mix: The lights are green*. Hot mix Asphalt Technology-January/February 2008. pp20-32.
- [36] **Xiao, F.; Amirkhanian, S.N.** (2010). *Effects of liquid antistrip additives on rheology and moisture susceptibility of water bearing warm mixtures*. Construction and Building Materials 24 (2010) 1649–1655.
- [37] **Technical Advisory ()**. *Warm mix asphalt – A State-of-art Review*. Australian Asphalt Pavement Association.
- [38] **You, Z.; Goh, S.W.** (2008). *Laboratory evaluation of warm mix asphalt: a preliminary study*. International Journal of Pavement Research and Technology 1(1):34-40.
- [39] **You, Z.; Goh, S.W.; Von Dam, T.J.** (2007). *Laboratory evaluation and pavement design of warm mix asphalt*. Proceedings of the 2007 Mid-Continent Transportation Research Symposium, Ames, Iowa, August 2007
- [40] **Vaitkus A.; Vorobjovas V.; Žiliut L.** (2009). *The research on the use of Warm Mix Asphalt for asphalt pavement structures*. Road Department, Vilnius Gediminas Technical University.
- [41] **Xiao, F.; Zhao, P.E.W.; Amirkhanian, S.N.** (2009). *Fatigue behavior of rubberized asphalt concrete mixtures containing warm asphalt mixtures*. Construction and Building Materials 23 (2009);3144-3151
- [42] **Silva, H.M.R.D.; Oliveira, J.R.M.; Peralta, J.; Zoorob, S.E.** (2010). *Optimization of warm mix asphalts using different blends of binders and synthetic paraffin wax contents*. Construction and Building Materials 24 (2010); 1621-1631.
- [43] **Hamzah M.O.; Jamshidi A.; Shahadan Z.** (2010). *Evaluation of the potential of Sasobit to reduce required heat energy and CO2 emission in the asphalt industry*. Journal of Cleaner Production 18 (2010) 1859:1865.
- [44] **Smith N.** (2008). *Double Barrel Green WMA Process*. Astec Industries, Inc.
- [45] **Bonaquist R.** (2009). *Mix Design Practices for Warm Mix Asphalt*. Advanced Asphalt Technologies LLC.
- [46] **Smith B.S.** (2006). *Design and construction of pavements in cold regions: state of the practice*. A Master of Science Thesis for Brigham Young University.
- [47] **Gibson N.; Corrigan M.** (2007). *Warm Mix Asphalt: Laboratory Characterization*. Presentation for the WMA Technical Working Group , Baltimore, Maryland.



- [48] **Kim H; Lee S.J.; Amirkhanian S.N.** (2010). *Rheology of warm mix asphalt binders with aged binders*. Construction and Building Materials 25 (2011) 183–189.
- [49] **Shang L.; Wang S.; Zhang Y.; Zhang Y.** (2010). *Pyrolyzed wax from recycled cross-linked polyethylene as warm mix asphalt (WMA) additive for SBS modified asphalt*. Article in press. Construction and Building Materials xxx (2010) xxx–xxx.
- [50] **Kuennen T.** (2004). *Warm Mixes are a Hot Topic*. Better Road Magazine, June 2004 Edition.
- [51] **Corrigan M.** (2010). *Warm Mix Asphalt: Recent Developments*. California Asphalt Pavement Association Conference, November 2010.
- [52] .

## WEBGRAFÍA

- [53] **Aspha-Min.** *Página web del producto*. [Online] Eurovia GmbH. [Consultada: 21 Febrero 2011.] <http://www.aspha-min.com/>
- [54] **Evotherm.** *Página web del producto*. [Online] MeadwestVaco. [Consultada: 19 Febrero 2011.] <http://www.meadwestvaco.com/SpecialtyChemicals/AsphaltAdditives/MWV002106>
- [55] **Low Energy Asphalt.** *Página web del producto*. [Online] LEA-CO. [Consultada: 14 Marzo 2011.] [http://www.leaco.com/lea\\_co/index2.php?lang=en](http://www.leaco.com/lea_co/index2.php?lang=en).
- [56] **Advera.** *Página web del producto*. [Online] PQ Corporation. [Consultada: 21 Febrero 2011.] <http://www.adverawma.com/>
- [57] **UltraFoam GX.** *Página web del producto*. [Online] Grencor Industries. [Consultada: 23 Febrero 2011.] [http://gencorgreenmachine.com/ultrafoam\\_process.html](http://gencorgreenmachine.com/ultrafoam_process.html)
- [58] **LT Asphalt.** *Página web del producto*. [Online] Nynas. [Consultada: 23 Febrero 2011.] [https://nyport.nynas.com/Apps/1112.nsf/wpis/GB\\_EN\\_LT-Asphalt/\\$File/LT-Asphalt\\_GB\\_EN\\_PIS.pdf](https://nyport.nynas.com/Apps/1112.nsf/wpis/GB_EN_LT-Asphalt/$File/LT-Asphalt_GB_EN_PIS.pdf)
- [59] **WAM-Foam.** *Página web del producto*. [Online] Shell Bitumen y Kolo Veidekke. [Consultada: 18 Febrero 2011.] [http://www.shell.com/home/content/bitumen/products/shell\\_wam\\_foam/](http://www.shell.com/home/content/bitumen/products/shell_wam_foam/).
- [60] **Low Energy Asphalt.** *Página web del producto*. [Online] LEA-CO. [Consultada: 14 Marzo 2011.] [http://www.leaco.com/lea\\_co/index2.php?lang=en](http://www.leaco.com/lea_co/index2.php?lang=en).
- [61] **Sasobit.** *Página web del producto*. [Online] Sasol Wax. [Consultada: 14 Marzo 2011.] <http://www.sasolwax.us.com/sasobit.html>
- [62] **Asphaltan B.** *Página web del producto*. [Online] Romonta GmbH. [Consultada: 14 Marzo 2011.]

- [63] **Licomont BS.** *Página web del producto.* [Online] Clariant International Ltd.. [Consultada: 14 Marzo 2011.] <http://additives.clariant.com/pa/ProductDataSheets.nsf/www/DS-OSTS-7SHE8W?open>
- [64] **3E LT.** *Página web del producto.* [Online] Colas. [Consultada: 14 Marzo 2011.] <http://www.colas.com/en/innovations/products/fiches-produits/colas-products/3e-asphalt-concrete-1100980.html>
- [65] **Cecabase RT.** *Página web del producto.* [Online] CECA. [Consultada: 15 Marzo 2011.] [http://www.cec.fr/sites/ceca/en/business/bitumen\\_additives/warm\\_coated\\_material/warm\\_coated\\_material.page](http://www.cec.fr/sites/ceca/en/business/bitumen_additives/warm_coated_material/warm_coated_material.page)
- [66] **Rediset WMX.** *Página web del producto.* [Online] Akzo Nobel. [Consultada: 15 Marzo 2011.] [http://www.akzonobel.com/surface/markets/asphalt/new\\_developments/rediset.aspx](http://www.akzonobel.com/surface/markets/asphalt/new_developments/rediset.aspx)
- [67] **Iterlow T.** *Página web del producto.* [Online] IterChimica. [Consultada: 15 Marzo 2011.] <http://www.iterchimica.it/en/prodotto.asp?language=ENG&id=2>