

Mezclas asfálticas tibias. Énfasis en tecnologías de espumado y uso de RAP

Warm mixtures of asphalt (WMA).
Focus on foam technologies and uses
of RAP (Recycled Asphalt Pavement)

SANDRA X. CAMPAGNOLI M.

Especialista en Geotecnia. Directora del Centro de Estudios Geotécnicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Profesora titular.

sandra.campagnoli@escuelaing.edu.co

Recibido: 04/05/2013 Aceptado: 03/06/2013

Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

Resumen

En este artículo se exponen los principales aspectos asociados con las tecnologías de mezclas asfálticas tibias (WMA, por su sigla en inglés), se presentan sus ventajas y limitaciones, así como la forma más común de clasificación, describiéndolas de manera general, pero haciendo especial énfasis en aquellas tecnologías en que se trabaja con la inyección de agua para el espumado del asfalto –previando el desarrollo de estudios sobre esta técnica– en los laboratorios de la Escuela Colombiana de Ingeniería, dada la disponibilidad de una planta piloto para fabricar asfalto espumado.

Igualmente, se presentan aspectos relacionados con el diseño, se resumen las principales características y propiedades de desempeño, y se hacen consideraciones sobre el empleo de RAP en las WMA.

Por último, se presentan algunas conclusiones y se dan recomendaciones orientadas a la implementación de las tecnologías de WMA en Colombia.

Palabras claves: mezclas asfálticas tibias, asfalto espumado, RAP, sostenibilidad.

Abstract

In this article the main aspects associated with warm asphalt mixtures technologies are detailed ; we discuss their advantages and limitations, as well as the most common ways of classifying, with general descriptions but with a particular focus on the technologies which are used to work on water injections for the asphalt foam – anticipating further studies on this technique in the laboratories of the Escuela Colombiana de Ingeniería, given the availability of a pilot plant to produce some asphalt foam.

The article also presents aspects related to the design, a summary of the main characteristics and properties of the performance and the uses of RAP and WMA are considered.

Finally, some conclusions are drawn and recommendations made about the implementation of WMA in Colombia.

Keywords: warm mixtures of asphalt, foam asphalt, RAP, sustainability.

INTRODUCCIÓN

La industria del asfalto está explorando continuamente desarrollos tecnológicos que mejoren el desempeño de los materiales, incrementen la eficiencia de la construcción, conserven los recursos naturales y protejan el ambiente. Las normativas vigentes sobre emisiones de gases, en especial de gases de efecto invernadero (*Greenhouse Gases*, GHG), y sobre conservación de la energía, han hecho atractivo considerar la reducción de las temperaturas de producción y colocación de las mezclas asfálticas.

El concepto de reducir la temperatura para producir mezclas asfálticas no es nuevo. El desarrollo de las emulsiones asfálticas en la primera parte del siglo XX y de los asfaltos espumados, a mediados de este mismo siglo, es prueba de ello. En años recientes se ha dado un fuerte impulso al desarrollo de las mezclas asfálticas tibias (*Warm Mix Asphalt*, WMA), en la búsqueda de elaborar mezclas a menores temperaturas, que sean equiparables, e incluso superiores, en sus propiedades y desempeño a las tradicionales mezclas asfálticas en caliente (*Hot Mix Asphalt*, HMA).

WMA es un término genérico usado para describir una gran variedad de tecnologías que permiten a los productores de HMA reducir las temperaturas a las cuales se mezclan los materiales –agregados pétreos y asfalto– y se colocan en la vía. Las reducciones de temperatura con respecto a las HMA varían, aproximadamente, entre 17 y 55 °C, dependiendo de la tecnología usada (1).

Además de la reducción de las temperaturas de mezcla y compactación, en las tecnologías de WMA se tiene la posibilidad de incorporar, en principio, con mayor facilidad que en las HMA, otras prácticas también consideradas sostenibles, como el empleo de pavimentos asfálticos recuperados (*Reclaimed Asphalt Pavement*, RAP) y de asfaltos modificados con caucho de neumáticos, haciéndose de esta manera mucho más atractivo su empleo.

En la última década, las tecnologías de WMA han recibido una gran atención de parte de la industria, de las agencias viales y de la academia, por lo que presentan un avance vertiginoso en países desarrollados. Una encuesta del National Center for Asphalt Technology (NCAT), de Estados Unidos, reveló que en el 2011, en dicho país, las WMA llegaron a ser del 20 al 30 % del total de las mezclas asfálticas producidas, mientras en el 2007 representaban tan sólo el 2 %. En ese mismo

país, de 3 tecnologías de WMA de que se disponía en 2005, se pasó a 23 en 2010, y de 15 estados que habían hecho tramos de prueba en 2007, se llegó a 45 en 2010. Grandes cantidades de WMA se están aplicando en los países de la Unión Europea, principalmente en Francia, Holanda, Alemania, así como en China, en donde se estima que para el 2010 se habían aplicado 3,5 millones de toneladas (2).

Para validar el desarrollo de las WMA, se han realizado numerosos estudios e investigaciones de laboratorio y de campo. En este último caso, tanto la industria privada como las agencias viales han realizado y documentado tramos de prueba, de alguna naturaleza (promoción, demostración, validación o implementación). Para mayo de 2012, la Australian Road Research Board (ARRB) había identificado más de 160 documentos relacionados con tramos de prueba en Estados Unidos, Canadá, Europa, Asia, Suráfrica y Australasia (3).

Los resultados de evaluación, efectuados tanto en campo como en laboratorio, han puesto en evidencia que el desempeño de las WMA es equiparable, e incluso mejor, en ciertas circunstancias, que el de las HMA, aun cuando se tienen algunas preocupaciones relacionadas con la susceptibilidad a la humedad y con la resistencia al ahuellamiento a edad temprana; así mismo, por tratarse de tecnologías relativamente jóvenes en su aplicación –muchas de ellas menores de diez años– todavía existen inquietudes sobre su comportamiento a largo plazo.

El rápido crecimiento que han tenido las WMA, con experiencias exitosas en la construcción de pavimentos, hace necesario realizar una mayor difusión de ellas en nuestro medio, donde prácticamente no se conocen, con el propósito de promover su desarrollo. En este artículo se recogen los principales aspectos asociados con estas tecnologías, se presentan sus ventajas y limitaciones y la forma más común de clasificación, describiéndolas de manera general, pero haciendo especial énfasis en aquellas tecnologías en las que se trabaja con la inyección de agua para el espumado del asfalto, previendo el desarrollo de estudios sobre esta técnica en los laboratorios de la Escuela Colombiana de Ingeniería, dada la disponibilidad de una planta piloto para fabricar asfalto espumado. Igualmente, se presentan aspectos relacionados con el diseño, se resumen las principales características y propiedades de desempeño y se hacen consideraciones sobre el empleo de RAP en las WMA. Por último, se presentan algunas conclusiones y se dan

recomendaciones, orientadas a la implementación de las tecnologías de WMA en el país.

CLASIFICACIÓN GENERAL DE LAS TECNOLOGÍAS DE WMA

Las mezclas asfálticas en general se clasifican de diferentes maneras, una de ellas por la temperatura empleada para su fabricación. En los extremos del espectro de temperatura se encuentran las mezclas asfálticas en frío, que se fabrican a temperatura ambiente, del orden de 10 a 30 °C, y las mezclas asfálticas en caliente (HMA, por su sigla en inglés), que típicamente se producen en un rango de temperaturas que van de 140 a 180 °C, dependiendo del tipo de cemento asfáltico usado. En el intermedio de las anteriores se encuentran las mezclas tibias (WMA) y las semitibias, que se diferencian por la temperatura resultante de la mezcla en planta (si es inferior a 100 °C, la mezcla es considerada semitibia¹).

Entre las mezclas tibias existe un amplio rango de temperaturas de producción, con tecnologías en las que las mezclas se elaboran 10 a 20 °C por debajo de la de las HMA y otras en las que la producción de la mezcla se realiza a temperaturas ligeramente superiores a los 100 °C.

Una manera común de clasificar las WMA es de acuerdo con la tecnología utilizada para reducir la temperatura. Aun cuando no se tiene una clasificación estandarizada, las WMA se pueden agrupar en cuatro grandes categorías, a saber:

- *Tecnologías de espumado o tecnologías con agua.* Se basan en el principio del aumento de volumen que sufre el cemento asfáltico en presencia de agua, con la consiguiente disminución en la viscosidad y en la tensión superficial, lo que hace posible su mezcla con los agregados a menores temperaturas. Se subdividen a su vez en:
 - *Sistemas de inyección de agua o espumado mecánico.* Pequeñas cantidades de agua fría (1 a 3 % de la masa de asfalto) se inyectan al asfalto caliente (140-170 °C), empleando un dispositivo especial,

para producir el espumado. Algunos ejemplos de tecnologías WMA que usan este sistema son *Double Barrel Green, Ultrafoam GX, Aquablack, Aquafoam, Accu-Shear, LEAB, Terex Foam Mix Asphalt System* y *WAM Foam*.

- *Aditivos minerales que contienen agua.* Zeolitas naturales o sintéticas liberan agua a medida que se incrementa la temperatura, causando que ésta se vaporice y genere el espumado del asfalto. Pueden añadirse directamente en el mezclador, junto con los llenantes minerales, o inmediatamente después de ellos, pero en ambos casos antes de introducir el cemento asfáltico. *Aspha-min* y *Advera* son algunos ejemplos de estas tecnologías.
- *Sistemas con adición de agregados finos húmedos.* Generalmente en este proceso se mezclan el agregado grueso caliente con el asfalto y luego se incorpora, a temperatura ambiente, el agregado fino con un contenido de humedad entre el 3 y 4%, lo que causa el espumado del asfalto. *Low Energy Asphalt (LEA)* es un ejemplo de estos sistemas.
- *Aditivos orgánicos o ceras.* En esta categoría es posible disminuir la temperatura de mezclado debido a la reducción, que el aditivo genera, en la viscosidad del asfalto. Ejemplos de ella son, entre otros, *Sasobit, Asphaltan A* y *Romonta N*.
- *Aditivos químicos.* Usualmente incluyen la combinación de agentes emulsificantes, surfactantes, polímeros o aditivos para mejorar el cubrimiento de los agregados por el asfalto, la trabajabilidad y la compactación, y promover la adherencia. *Evotherm, Evotherm ET, 3G, Evotherm DAT, Rediset WMX, Cecabase* y *Revix* son algunos ejemplos dentro de esta categoría.
- *Sistemas híbridos.* Corresponden a la combinación de algunas de las tecnologías anteriores, como el *Low Emission Asphalt*.

A continuación se resumen algunos aspectos relacionados con varias de las tecnologías más comunes de WMA (cuadro 1). Se indican los requerimientos de las plantas convencionales de HMA para adaptarlas a la tecnología de WMA específica, el uso de aditivos, las temperaturas de producción y los costos asociados. De esta información es posible concluir que mientras en la mayoría de las tecnologías de espumado con sistema de inyección de agua se requiere una inversión inicial

1. En algunos ambientes de habla hispana, las mezclas semitibias se conocen también como mezclas templadas.

Cuadro 1 Descripción general de algunas tecnologías de WMA^(3,4,16,26,27)

Tecnología	Descripción	Modificación Planta	País	Aditivos	Temperatura ¹	Costos adicionales
Double Barrel Green	Inyección de agua para espumado del asfalto	Tanque de reserva para el agua, sistema de control de inyección de agua con boquillas de espumado. El fabricante ofrece el kit completo y se puede instalar en plantas continuas y discontinuas de cualquier marca.	Estados Unidos	Agente <i>antistripping</i> , por elección.	116 - 135 °C	Entre US\$100.000 y US\$120.000 por modificación de equipo e instalación. Ningún incremento en el costo de la mezcla.
Aquablack WMA	Inyección de agua para espumado del asfalto	Boquillas de espumado, bomba de agua, sistema medidor y panel de control.	Estados Unidos	No son necesarios.	No está especificada	N.D.
Warm Mix Asphalt System	Inyección de agua para espumado del asfalto	Tanque de agua, bomba de agua, medidor de agua, cámara de expansión con múltiples boquillas.	Estados Unidos	No son necesarios.	[<32° C]	N.D.
LEAB	Basada en agua - Mezcla de agregados por debajo del punto de ebullición del agua.	Seis boquillas con cámaras de expansión se instalan en la línea de suministro de asfalto	Holanda	0,1 % del peso del asfalto para promover adherencia y cubrimiento.	90° C	N.D.
Low Energy Asphalt (LEA)	Basado en agua - Agregado grueso caliente mezclado con arena húmeda.	Tolva para alimentación del agregado fino húmedo con sistema medidor, adición de humedad y sistema de control, sistema de bomba y medidor en línea para aditivos.	Estados Unidos, Francia, España, Italia	±0,5 % del peso del asfalto, aditivo promotor de adherencia y cubrimiento.	105 - 124°C o ≤100°C	Modificación de equipos y costos de instalación entre US\$75.000 y US\$100.000. Incremento en costo de la mezcla entre US\$0,50 y US\$1,00.
Advera	Agua aportada por aditivo mineral -empleo de zeolita.	Alimentador modificado o selección de equipos especiales, ofrecidos por el productor del aditivo	Estados Unidos	0,25 % por peso de mezcla.	[10 - 30 °C]	N.D.
Aspha-min	Agua aportada por aditivo - zeolita sintética.	Añadido en la planta de diferentes maneras (manual o automáticamente, en alimentación del RAP o de paleta).	Alemania, Estados Unidos	0,3% del peso de la mezcla.	[30°C]	N.D.
Sasobit	Uso de cera Fisher - Tropsch, en forma de polvo blanco o granulado.	Alimentador modificado o bomba neumática para adición en línea, o unidad de mezclado para agitar el Sasobit con el asfalto caliente. Cambio en el programa de mezclado, si se añade en el mezclador con peso en tolva. No se requieren modificaciones si es en forma de emulsión.	Principalmente Alemania, Unión Europea, Estados Unidos	1,0 a 3,0 % del peso de asfalto, dependiendo del país.	[10 - 54° C]	Ninguno a US\$40.000 por modificación de equipos o costos de instalación, US\$1,7/kg por costo de material. Incremento en costo por tonelada de mezcla entre US\$1,30 y US\$2,60.
WAM-Foam	Proceso de espumado usando dos grados de asfalto. Asfalto blanco seguido por un asfalto duro espumado.	Se requiere una nueva línea de asfalto con sistema de adición de agua (boquilla) para introducir el asfalto duro en la mezcla. Las plantas de tambor son más fáciles de modificar.	Francia, Inglaterra, Holanda, Italia, Estados Unidos, Noruega	Pueden agregarse agentes <i>antistripping</i> al asfalto blanco	80 - 120° C, incluso se ha reportado a 62°C	US\$30.000 a US\$70.000 por modificación de la planta o costos de instalación. Impuestos entre US\$5.000 y US\$15.000 por año e incremento en costo de US\$0,30 por tonelada.
Evotherm ET	Paquete químico de agentes emulsificantes y aditivos.		E. Unidos, Francia, otros países emulsión.	Despachado en forma de emulsión.	[37 - 75°C] 85 - 115°C	N.D.

1. Temperatura de producción (rango de reducción de temperatura).

N.D.: no disponible.

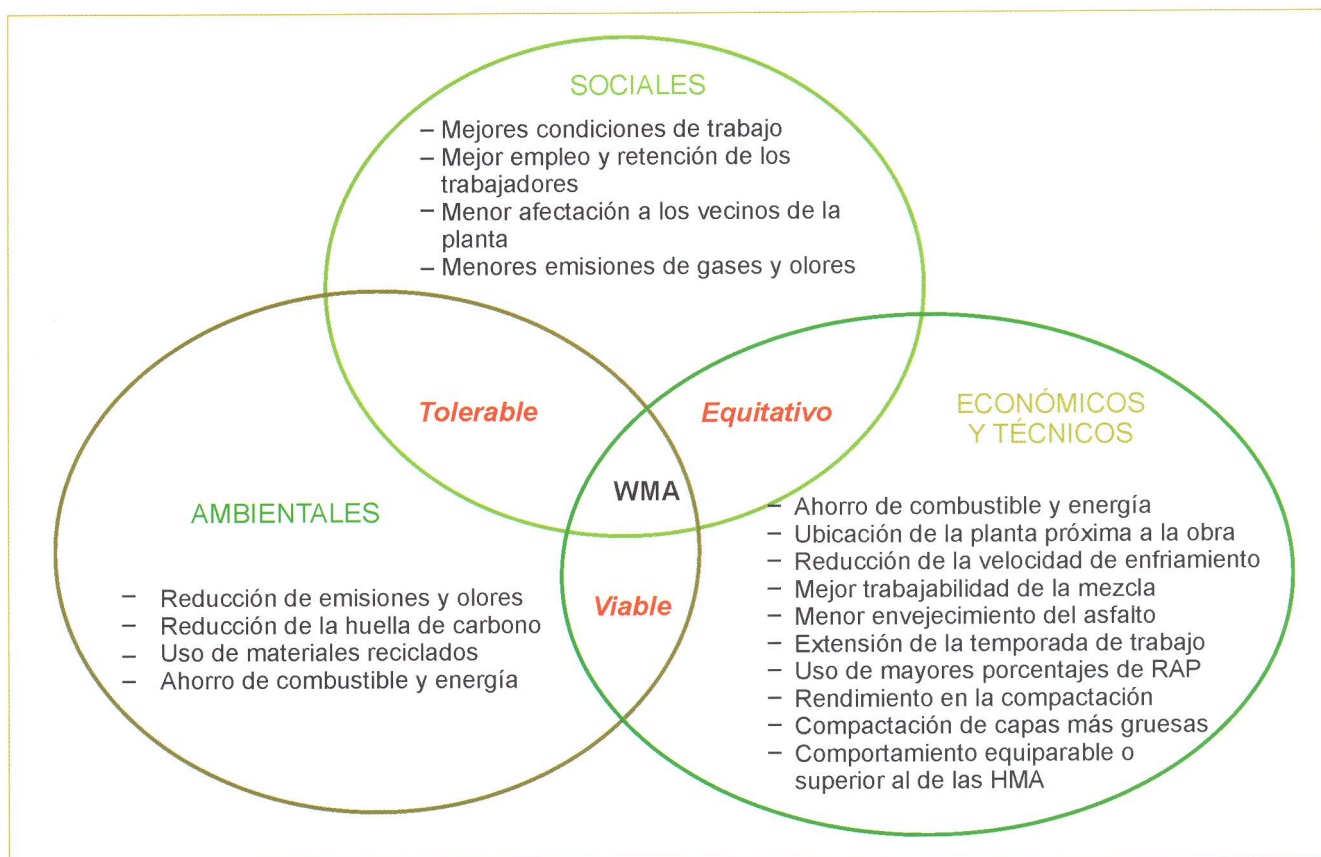


Figura 1. Beneficios de las tecnologías WMA.

en equipos para la adaptación de la planta, en las tecnologías que emplean aditivos –minerales, químicos u orgánicos– esta inversión es baja o prácticamente nula, pero se tiene un incremento permanente de costo en las mezclas, derivado del costo de los aditivos.

VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LAS WMA

Las tecnologías de las WMA tienen diferentes niveles de impacto, dependiendo de cuánto se pueda reducir la temperatura de producción y, podría decirse, presentan diferente desempeño, dependiendo del tipo de proceso o de aditivo empleado; pero, en general, son tecnologías consideradas sostenibles por los beneficios ambientales, sociales, económicos y técnicos que se derivan de ellas (figura 1).

En cuanto a limitaciones, al igual que con los beneficios, éstas dependen del tipo de tecnología. De manera general, relacionadas con el desempeño de las WMA, se han observado las siguientes:

- Mayores niveles de deformación permanente –ahuellamiento– a edades tempranas, atribuibles posiblemente al menor envejecimiento del asfalto que se presenta al calentarlo a temperaturas más bajas.
- El comportamiento a largo plazo resulta difícil de precisar, por tratarse de tecnologías relativamente jóvenes, con datos insuficientes para su evaluación.
- Las menores temperaturas de mezcla y compactación también pueden contribuir a un secado incompleto de los agregados o a una vaporización parcial del agua en las tecnologías que involucran la introducción de este elemento para el espumado del asfalto, y conducir así a un incremento potencial de daño inducido por humedad en la mezcla resultante.
- Se requiere un tiempo de curado, especialmente en aquellas tecnologías cuyos procesos o productos incorporan humedad, para promover el cubrimiento de los agregados, al igual que la trabajabilidad y la compactación de las mezclas.

- Algunas características del asfalto pueden verse afectadas por ciertos aditivos, particularmente por los de tipo orgánico, los cuales, a bajas temperaturas, tienden a hacerlo más rígido, incrementándose el potencial de fisuración térmica.
- Mayores costos derivados de la implementación de la tecnología, asociados a las modificaciones necesarias de la planta de elaboración de la mezcla, a los aditivos o incluso a los costos de patentes.
- Algunos beneficios ambientales pueden perderse con la huella de carbón encubierta en algunas tecnologías que requieren la producción de aditivos o la fabricación de equipo adicional para la elaboración de la WMA. Es necesaria una adecuada evaluación del ciclo de vida.

LAS TECNOLOGÍAS DE ESPUMADO MECÁNICO - DISEÑO Y DESEMPEÑO

Varias técnicas se aplican para transformar, de manera temporal, el asfalto en espuma, con la consecuente reducción de su viscosidad, en un corto periodo, lo que facilita la mezcla y el cubrimiento de los agregados por el asfalto a menores temperaturas. Cuando la espuma colapsa, el asfalto recupera su condición original, en principio, sin cambios en sus propiedades químicas ni reológicas.

Mientras que en laboratorio es relativamente simple producir WMA usando aditivos orgánicos o químicos con tecnologías de espumado que involucran sistemas de inyección de agua fría (1 a 3 %) al asfalto caliente (140 a 170 °C), resulta un poco más complicado reproducir, con propósitos de diseño, los procesos de producción y de compactación que se efectúan en planta y en campo. Los sistemas, procesos, equipos, boquillas, su distribución y ubicación en la planta y, en general, los principios de espumado, varían entre los proveedores o fabricantes de los equipos. Más adelante se presentan algunos ejemplos de boquillas y cámaras donde se produce el espumado del asfalto (figuras 2 y 3).

Para fabricar la espuma en laboratorio, tratando de simular las condiciones de producción en la planta de mezcla de algunas tecnologías de espumado, se han diseñado equipos piloto (figuras 4 y 5). Con este mismo propósito, se han ideado sistemas como el que se muestra esquemáticamente en la página siguiente (figura 6).

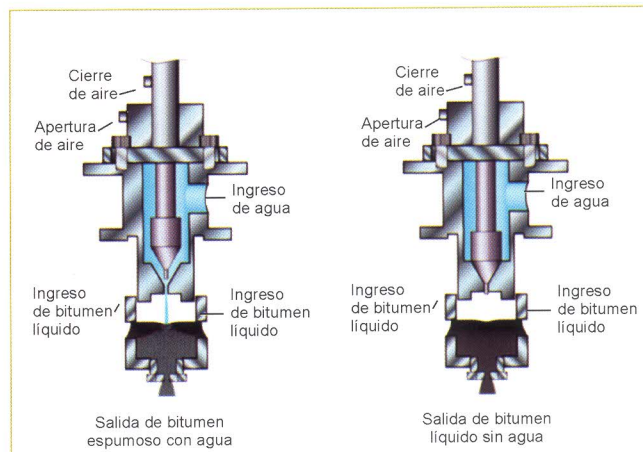


Figura 2. Boquilla del *Double Barrel Green*, de Astec (5).

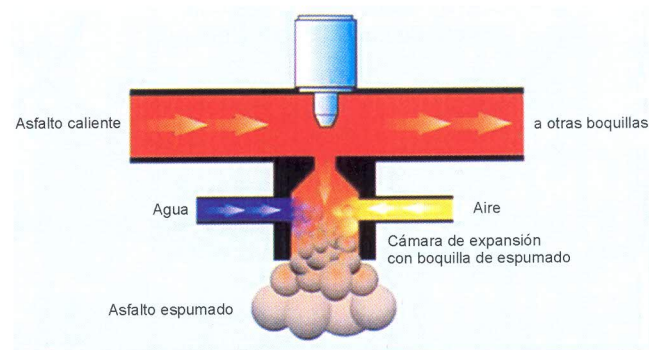


Figura 3. Boquilla de espumado, tecnología Wirtgen GmbH (6).



Figura 4. Esquema del *Foamer*, Pavement Technology Inc. (7).

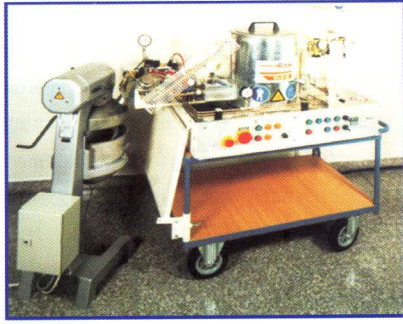


Figura 5. Planta piloto para fabricar asfalto espumado, Wirtgen GmbH.

Varias de las tecnologías de espumado mecánico para fabricar WMA están patentadas, y no se tienen estudios disponibles sobre cómo los equipos o sistemas para la fabricación de la espuma de asfalto afectan la calidad de ésta, en cuanto a la relación de expansión –relación entre el volumen máximo del asfalto en forma de espuma y el volumen de éste una vez que la espuma ha menguado completamente– y a la estabilidad o vida media –tiempo, medido en segundos, que tarda la espuma en sedimentarse desde su volumen máximo hasta la mitad del volumen expandido–.

Algunos proveedores de estas tecnologías, como Stansteel™ y Maxam Equipment, aseguran que con sus sistemas Accu-Shear™ y AQUABlack™ la acción de espumado del asfalto aumenta más que en los

métodos tradicionales de inyección de agua. En el caso de Accu-Shear, se utiliza un proceso especial de cizallamiento para mezclar el agua con el asfalto, por medio de un molino coloidal, y también es posible introducir, junto con el agua, aditivos químicos usados para fabricar WMA u otros aditivos líquidos, para favorecer el espumado o promover la adherencia del asfalto con los agregados. AQUABlack utiliza un sistema patentado, desarrollado por Maxam, denominado Microbubble™, con el que se producen microburbujas en el asfalto al inyectar agua a una presión superior a las 1000 lb/pg², aumentando la expansión y mejorándose la trabajabilidad de la mezcla por un tiempo mayor, debido a que la espuma es más estable.

Está demostrado que las propiedades de la espuma también dependen de la cantidad de agua inyectada, de la temperatura del asfalto y de la fuente y del tipo de asfalto, aun cuando no se tiene una relación directa entre las propiedades físicas de éste y el comportamiento de la espuma. El empleo de ciertos aditivos, tales como surfactantes o superplastificantes, puede promover una mejor calidad de la espuma.

Actualmente, no se cuenta con correlaciones entre las propiedades de la espuma y las propiedades de la mezcla, tales como compactación, densidad o trabajabilidad. Aunque es evidente el efecto benéfico del espumado en el momento de la elaboración de la mezcla, aún no se tiene claro, en estas tecnologías, por cuánto

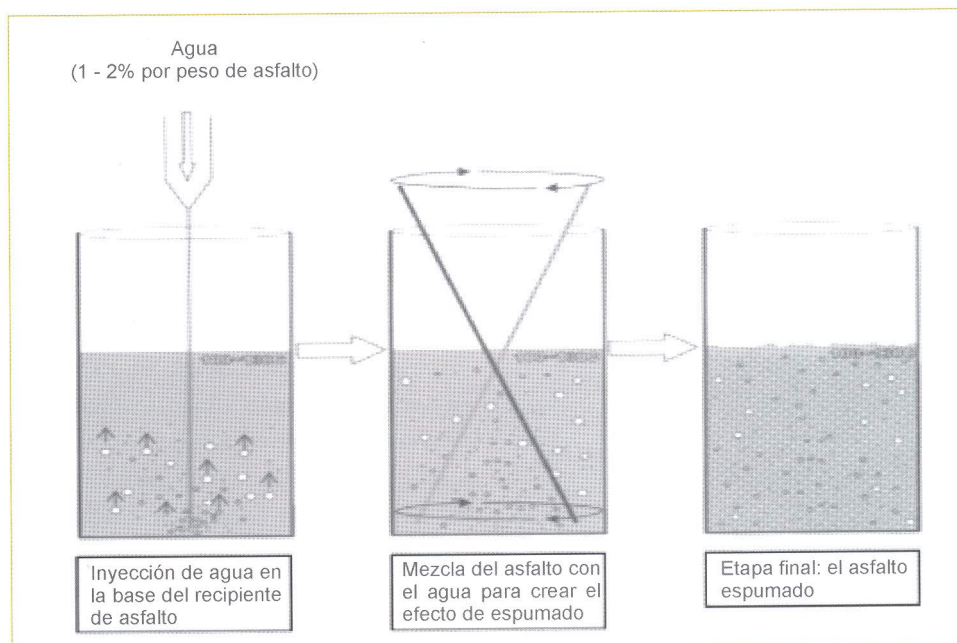


Figura 6. Sistema para la fabricación de asfalto espumado en el laboratorio (8).

tiempo permanece la mezcla trabajable para realizar la compactación. Por lo anterior, guías para la evaluación de la espuma de asfalto, para su empleo en la fabricación de WMA, no han sido implementadas por la industria o especificadas por las agencias viales.

De varios de los sistemas de espumado no se conoce que tengan disponibles plantas pilotos para los diseños de laboratorio, por lo que normalmente las mezclas tibias con esta tecnología se elaboran siguiendo sólo las recomendaciones del fabricante. En algunos casos, en los diseños de laboratorio se emplea asfalto no espumado a menor temperatura para elaborar las mezclas y luego las propiedades se verifican directamente con el material producido en planta. La práctica más extendida para el diseño de las WMA consiste en utilizar los procedimientos de diseño de una HMA estándar, siguiendo las metodologías Marshall o Superpave, con ligeras adaptaciones.

En el Reporte 691 de la National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) (9), se presentan recomendaciones sobre los métodos de diseño de mezclas para las WMA, las cuales están incluidas en el apéndice "Consideraciones especiales y métodos de diseño de mezclas asfálticas tibias (WMA)" de la norma AASHTO R35. Una de las consideraciones más relevantes de este reporte es que para el diseño de una WMA se pueden aplicar los resultados de los diseños de una HMA, cuando la absorción de asfalto en la mezcla es menor de 1 %. De hecho, aun cuando en las WMA se reconoce que, debido a las menores temperaturas de mezclado se presenta en principio una menor absorción de asfalto por parte de los agregados, normalmente las mezclas se fabrican con el contenido de asfalto correspondiente al óptimo determinado en el diseño de la HMA.

En las tecnologías de WMA en general, en particular en las que involucran el espumado mecánico del asfalto, las temperaturas de mezcla y de compactación están asociadas a aquellas con las cuales se obtienen un adecuado cubrimiento de los agregados por el asfalto y una compactabilidad apropiada de la mezcla. Algunas referencias (4) indican que la selección de la temperatura de compactación se puede hacer comparando la densidad de probetas de WMA, fabricadas a diferentes temperaturas, con la densidad de una HMA de referencia (la temperatura de la WMA a la cual ambas densidades son iguales se toma como la temperatura de compactación).

Para las tecnologías de WMA en las que se incorpora agua para el espumado del asfalto, varias referencias (9, 10) sugieren tener en cuenta en los diseños en laboratorio un tiempo de curado de la mezcla, antes de la compactación, para expeler la humedad y obtener así predicciones de comportamiento más realistas.

Teniendo en cuenta que en la WMA la compactabilidad, el cubrimiento, la resistencia a la deformación permanente - ahuellamiento y la susceptibilidad a la humedad de la mezcla, varían con respecto a la HMA, estas propiedades deben ser evaluadas dentro de los procesos de diseño. Un gran número de investigaciones efectuadas en laboratorio se han enfocado en la evaluación de estas propiedades, comparándolas con las encontradas en una HMA equivalente.

En estudios realizados en la Michigan Technological University, por Wei Goh (8), donde se trabajó con el sistema de espumado ya mostrado (figura 6), se elaboraron mezclas tibias con espumas de asfalto, fabricadas variando la concentración de agua (1, 1,5 y 2 %) y las temperaturas de calentamiento del asfalto (100, 115 y 130 °C) a las cuales también se les hicieron la mezcla y la compactación. Las probetas así fabricadas se ensayaron y evaluaron, comparándolas con una HMA equivalente o de control, elaborada a 165 °C y compactada a 153 °C, con los siguientes resultados: el módulo dinámico $|E^*|$ de las WMA no se vio afectado por la temperatura ni por la cantidad de agua y, en todos los casos, su magnitud fue inferior al obtenido en la HMA de control; la resistencia a la tracción indirecta (ITS) también fue menor en las WMA que la de la mezcla de control y, en algunos casos, la resistencia conservada fue superior a 1,0. Las WMA presentaron mayor vida de fatiga y mayor ahuellamiento que la HMA de control.

En estudios efectuados en el estado de Washington (11, 12) se evaluó el comportamiento en laboratorio y en campo de varias tecnologías de mezclas tibias, entre ellas las de espumado mecánico, comparándolas también con HMA equivalentes, usadas como control. Los resultados de campo revelan que en las WMA se alcanzaron compactaciones y desempeños semejantes a los de las mezclas de control. Las propiedades, medidas en el laboratorio, de rigidez, fatiga y de susceptibilidad a la humedad, también fueron equiparables a las obtenidas en las correspondientes HMA, exhibiendo, en general, mayor resistencia a la fisuración térmica y menor resistencia al ahuellamiento que éstas. La conclusión

general de estos estudios es que las WMA parecen ser una alternativa aceptable para remplazar las HMA.

Ali y otros (13) evaluaron el comportamiento en laboratorio de WMA fabricadas con calizas y gravas naturales y asfaltos convencionales y modificados, espumados en una planta piloto (figura 5). Los resultados muestran en las WMA gravedades específicas máximas ligeramente menores que en las HMA equivalentes, tal vez debido a dos factores: la presencia de burbujas de aire en el asfalto espumado, aun después del mezclado, y la reducción ligera que se presenta en la cantidad de asfalto absorbido por el agregado. En todos los casos, en las WMA se presentó buen cubrimiento de los agregados por el asfalto, mejores trabajabilidad y compactabilidad, menores resistencias a la tracción indirecta (ITS), y resistencias conservadas y módulos dinámicos similares a los obtenidos con las HMA equivalentes. Los resultados sugieren que usando agregados y asfaltos apropiados se pueden resolver los efectos adversos que pueda presentar la tecnología de espumado en el desempeño de la mezcla y corroboran que las WMA se pueden producir y colocar a menores temperaturas, dando lugar a mezclas con propiedades, en general, similares a las de las HMA tradicionales.

Sobre las WMA que emplean la técnica de espumado, varias agencias viales e investigadores tienen inquietudes sobre el agua que pueda permanecer, tanto en las muestras de laboratorio como en el pavimento en servicio, por un periodo de tiempo significativo después de la compactación. Es posible que al realizar los ensayos los resultados se vean afectados significativamente por la presencia de agua y no sea posible predecir con mayor precisión el desempeño real de las mezclas en servicio. Las evidencias obtenidas por el Instituto de Transporte y la Universidad de Texas A&M (14) indican que, ocasionalmente, las mezclas frescas o recién fabricadas no pasan la prueba de ahuellamiento en la rueda de Hamburger, pero cumplen después de cierto periodo, por lo que recomiendan un procedimiento de curado.

Aun cuando los resultados de laboratorio para las WMA que emplean técnicas de espumado, algunas veces predicen que no se comportarán tan bien como las HMA en términos de susceptibilidad a la humedad y al ahuellamiento, los resultados obtenidos en el campo y en tramos de prueba de diferentes categorías: desarrollo, demostración, implementación o validación, indican lo contrario (3, 15, 16, 17). En estas experiencias, las

temperaturas de producción de las WMA han variado entre 120 y 145 °C y las mezclas han sido colocadas a temperaturas tan bajas como 115 °C, con ahorros de energía del 24 %. Los resultados han puesto en evidencia que las WMA presentan comportamientos equiparables al de las HMA usadas de referencia, con buena trabajabilidad, compactación equivalente y adecuada rigidez. Su resistencia en pruebas de tracción indirecta se incrementa con el tiempo a valores similares a los obtenidos con las HMA, no se aprecia una diferencia sustancial entre el ahuellamiento de los dos tipos de mezcla y se ha visto que son más resistentes al agrietamiento térmico que sus correspondientes HMA.

En síntesis, en la producción de WMA con técnicas de espumado, la durabilidad y el daño por humedad son las mayores preocupaciones. Sin embargo, el uso de aditivos *antistripping* y, en especial, de cal hidratada, para disminuir la susceptibilidad a la humedad, ha sido probado con buenos resultados (7).

Así mismo, se han tenido experiencias exitosas de las tecnologías WMA con espumado mecánico, empleando asfalto – caucho (19, 20), asfaltos modificados con polímeros y, en particular, usando diferentes concentraciones de asfaltos recuperados de pavimentos (RAP).

RAP EN LAS WMA

La escasez de fuentes de agregados pétreos y el aumento en las distancias de transporte de estos materiales, con los consecuentes incrementos en los costos, en los consumos energéticos y en la emisión de gases, los elevados costos del asfalto y el uso racional de los recursos no renovables, son las razones principales que han conducido a las agencias de transporte y a los contratistas, a mostrar un creciente interés en el uso de RAP en aplicaciones viales, especialmente en la producción de mezclas asfálticas.

El empleo de 20 a 50 % de RAP en las mezclas asfálticas puede generar ahorros del orden del 35 % en su costo, por lo que resulta ideal maximizar la cantidad de RAP para minimizar la cantidad de materiales vírgenes y, por consiguiente, el costo de la mezcla. De manera general, en una mezcla asfáltica se define un alto contenido de RAP a partir del 25 % de este material por masa de la mezcla total (21).

En Estados Unidos, el empleo de RAP en mezclas asfálticas ha tenido un crecimiento importante en los



últimos años. En 2007, la FHWA conformó un grupo de expertos para promover su uso entre los contratistas y las agencias de transporte. Para ese mismo año, el RAP constituía, aproximadamente, el 12 % en volumen del total de las mezclas asfálticas producidas en este país. Entre los años 2007 y 2009, cerca de 27 estados incrementaron la cantidad de RAP permitida en las mezclas asfálticas, y para el 2009, 23 habían experimentado con altos contenidos de RAP. En el año 2011, más de 40 estados ya permitían el empleo de RAP en cantidades superiores al 30 %. La limitación de la proporción de RAP en las mezclas asfálticas se ha debido, principalmente, a la ausencia de guías que orienten su uso y de información documentada sobre su desempeño a largo plazo.

El RAP es inherentemente un material rígido, debido al endurecimiento sufrido por el asfalto a causa de la oxidación y de otros mecanismos de envejecimiento que tienen lugar durante la exposición al ambiente del pavimento en servicio. La presencia de RAP en las mezclas asfálticas aumenta su rigidez, haciéndolas más propensas al agrietamiento, lo que ha sido otra razón para que se limite su uso.

En un esfuerzo por reducir el efecto de rigidización de las mezclas, asociado con el asfalto envejecido del RAP, recientemente se ha introducido su empleo en los procesos de WMA, aumentando así los beneficios de pavimentación sostenible, probados en ambas tecnologías. En general, se ha encontrado que las WMA con alto contenido de RAP no presentan cambios significativos en sus propiedades o en el desempeño, aun cuando son mezclas más rígidas, lo que sugiere una mayor susceptibilidad al agrietamiento. Sin embargo, si se comparan con las mismas WMA, sin RAP, aquellas presentan mayor resistencia al ahuellamiento y menor susceptibilidad a la humedad.

La mayor posibilidad de uso de RAP en las WMA se encuentra justificada en la reducción en la temperatura de mezclado. Se prevé que la mezcla del asfalto envejecido del RAP con el asfalto adicionado en el proceso en tibio tendrá mejores propiedades que las de la misma mezcla de asfaltos, obtenida a través de un proceso en caliente, debido al menor envejecimiento que se presenta en los asfaltos. Adicionalmente, con la reducción de la viscosidad del asfalto en las WMA, mezclas más rígidas se pueden hacer más fáciles de trabajar.

Los factores claves que gobiernan la producción de mezclas asfálticas con RAP de buena calidad incluyen la uniformidad en las propiedades de los agregados y del asfalto presentes en el RAP y el conocimiento de dichas propiedades, especialmente el contenido de asfalto se debe tener en cuenta en la etapa de diseño, verificando regularmente su consistencia. Si el contenido de RAP supera el 12 %, se recomienda triturarlo y tamizarlo para separarlo por fracciones, asegurando de esta manera su consistencia y facilitándose el control de su granulometría y de su contenido de asfalto.

El RAP se puede obtener de las capas asfálticas existentes con máquinas fresadoras, lo cual constituye la práctica más común en muchos países desarrollados, aun cuando para este mismo propósito también es posible el uso de excavadoras o de buldóceres. El RAP luego es transportado a sitios de acopio o a plantas de trituración o de producción de mezclas asfálticas. El material obtenido por fresado tiene ventajas sobre las otras formas de obtención, entre ellas la fragmentación hasta alcanzar un tamaño uniforme y el retiro en el espesor especificado sin alteración de las capas subyacentes, preservándose así la calidad del material.

Otro aspecto importante que hay que considerar en los procesos de WMA que involucran el uso de RAP es el contenido de humedad de este material. Altos contenidos de humedad dan lugar a una disminución en la tasa de producción de la mezcla e incrementan los costos de energía y la emisión de gases. Tan solo un cambio del 1 % en el contenido de humedad, resulta en un cambio del 10 % en el consumo de combustible requerido para calentar el RAP. Por lo anterior, es ideal que la humedad en el RAP sea uniforme y no exceda de 4 %. Tomando en cuenta que el RAP, por su naturaleza, tiende a retener humedad en mayor extensión que los agregados, se han generado guías y orientaciones (2, 19) para su acopio y procesamiento.

En la práctica, el asfalto comúnmente empleado en las WMA que contienen 10 % RAP corresponde al tipo 60/70. Cuando el porcentaje de RAP aumenta, se hace necesario usar asfaltos más blandos, como los de los tipos 80/100 o 150/200. La selección del asfalto apropiado dependerá no solamente de la cantidad de RAP, sino también de las propiedades del asfalto que éste contenga. Los diseños con RAP requieren hacer suposiciones con respecto a la interacción entre el asfalto envejecido del RAP y el asfalto adicionado. El

concepto de roca negra asume que el asfalto del RAP no interactúa con el asfalto nuevo, mientras que el concepto de mezcla total asume una interacción completa. En el primer caso, el asfalto presente en el RAP no es tenido en cuenta, en el segundo sí. A la fecha, no hay una teoría definitiva a este respecto, requiriéndose mayores estudios en los que se investigue cómo es la interacción entre el asfalto envejecido y el asfalto adicionado en los procesos de fabricación de las WMA.

Se han realizado estudios, tanto en campo como en laboratorio, para evaluar el comportamiento de las WMA que emplean la técnica de espumado, con diferentes concentraciones de RAP y, en general, se han obtenido comportamientos adecuados (23, 24, 25). Por ejemplo, Middleton y Forfyflow (16), investigaron las propiedades de WMA fabricadas en el Double Barrel Green, usando concentraciones de RAP de 15 y 50 %, comparando su comportamiento con el de mezclas fabricadas con agregados vírgenes, concluyendo que la presencia de RAP no rigidizó significativamente las mezclas y se mejoraron las resistencias al ahuellamiento y al daño por humedad. En Alemania se han construido tramos experimentales con contenidos de RAP tan altos como 90-100 %, empleando *Sasobit* y *Aspha-min* para la elaboración de las WMA. En Holanda, la técnica LEAB para fabricar WMA se realiza de manera rutinaria usando 50 % de RAP.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Numerosas investigaciones reconocen en las WMA beneficios ambientales, sociales, económicos y técnicos, cuya magnitud varía dependiendo de la tecnología. En general, coinciden en que con las WMA se obtienen reducciones en el consumo de energía y en la emisión de GHG y una mejor trabajabilidad, lográndose compactaciones adecuadas en condiciones climáticas adversas, siendo posible operar mayores distancias de acarreo, incorporar mayores concentraciones de RAP y mejorar las condiciones de trabajo de los operadores.
- Empleando tecnologías de WMA, se han fabricado mezclas densas, mezclas de tipo SMA, mezclas porosas y másticos, usando diferentes tipos de agregados y de asfaltos, incluyendo asfaltos modificados con polímeros. Las mezclas han sido colocadas en una gran variedad de espesores, para soportar diferentes niveles de tránsito, comportándose satisfactoriamente.
- Las WMA admiten mayores concentraciones de RAP que las HMA, lo que las hace más atractivas desde puntos de vista energético, económico y de preservación de los recursos naturales.
- Para las tecnologías de WMA que usan agua para el espumado del asfalto, se tienen inquietudes acerca de su desempeño, en especial con respecto al daño inducido por la humedad y a las deformaciones permanentes que se puedan presentar a edades tempranas. Sin embargo, las experiencias de campo están poniendo en evidencia un adecuado comportamiento en estos aspectos.
- Mientras que en el laboratorio es relativamente simple producir WMA con aditivos orgánicos o químicos, debido a que solamente requieren la adición de la cantidad correcta de aditivo, la producción de WMA usando tecnologías de espumado mecánico es complicada, por cuanto requiere equipos especiales.
- El desarrollo de las WMA es, sin lugar a dudas, uno de los mayores logros recientes de la industria del asfalto. Los tramos de prueba contribuirán en gran medida a ganar suficiente confianza y conocimiento para la producción y la colocación a temperaturas, como mínimo 20 °C por debajo de las mezclas tradicionales en caliente, así como para la incorporación de cantidades significativas de RAP.
- Teniendo en cuenta que el desempeño de las tecnologías de WMA varía dependiendo de las circunstancias, para evaluar las características de un proceso y de un producto en particular, es recomendable ejecutar un examen cuidadoso con los materiales locales, en las condiciones climáticas del proyecto, antes de su implementación. Las WMA tienen el potencial para remplazar las HMA y, en circunstancias especiales, pueden tener ventajas sobre éstas.
- Una estrategia en la promoción y evaluación de las tecnologías de WMA es incluir, en las demostraciones o tramos de prueba, una sección construida con una HMA de control o equivalente, colocada en las condiciones especificadas, lo que permitirá una comparación directa de la trabajabilidad y del desempeño en campo.
- Es recomendable implementar análisis de costos e impactos del ciclo de vida, que involucren la evaluación de la producción de los materiales vírgenes

y la manufactura de las mezclas, al igual que su distribución, uso y disposición. El desarrollo y la implementación de las WMA dependerá, en gran medida, de los resultados que se obtengan de esta evaluación.

REFERENCIAS

- Campagnoli, S.X. (2012, julio-septiembre). Algunas prácticas asociadas con el desarrollo sostenible en pavimentos. *Revista Escuela Colombiana de Ingeniería*, N.º 87. ISSN 0121-5132, pp. 15-25.
- Sabita (2011, September). *Best practice guideline for warm mix asphalt Manual* 32.
- Papacostas, A., Vuong, B., Sharp, K., Rebbechi, J., Boer, S. (2012, November) *Review of Overseas Trials of Warm Mix Asphalt Pavements and Current Usage by Austroads Members Austroads*. Technical Report AP-T215-12. ISBN 978-1-921991-57-8 ARRB Group.
- Zaumanis, M. (2010). *Warm mix asphalt investigation*. Master of Science thesis, Technical University of Denmark. In cooperation with: Danish Road Institute, Denmark.
- http://es.astecinc.com/index.php?option=com_content&view=article&id=117&Itemid=188.
- Wirtgen GmbH. *Foamed bitumen – The innovative binding agent for road construction*.
- Malladi, H. (2012). *Laboratory Evaluation of Warm Mix Asphalt Technologies for Moisture and Rutting Susceptibility*. A thesis submitted to the Graduate Faculty of North Carolina State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science Raleigh, North Carolina.
- Goh, Shu Wei (2012). *Development and improvement of Warm-Mix Asphalt Technology*. A dissertation, Submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Civil Engineering. Michigan Technological University.
- Bonaquist, R. (2011). *Mix Design Practices for Warm Mix Asphalt*. NCHRP Report 691. Transportation Research Board. Washington, D.C.
- Chowdhury, A. Button, J.W. (2008). *A Review of Warm Mix Asphalt*, Report 473700-00080-1. Texas Transportation Institute, Texas A&M University. System College Station, Texas.
- Bower, N., Wen, H., Willoughby, K., Weston, J., DeVol, J. (2012, October). *Evaluation of the Performance of Warm Mix Asphalt in Washington State* WA-RD 781.1 - WSDOT Research Report.
- Bower, N. (2011, December). *Laboratory evaluation of performance of warm mix asphalt in Washington State*. A thesis submitted in partial fulfillment of requirements for the degree of Master of Science in Civil Engineering. Washington State University. Department of Civil and Environmental Engineering.
- Ali, A. W., Abbas, A.R., Nazzal, M., Powers, D. (2012). *Laboratory Evaluation of Foamed Warm Mix Asphalt*. *International Journal of Pavement Research and Technology*, vol. 5, N.º 2.
- Estakhri, C., Button, J. & Alvarez, A. (2010, July). *Field and laboratory investigation of Warm Mix Asphalt in Texas*. Texas Transportation Institute Texas A&M University System. FHWA/TX-10/0-5597-2.
- Kvasnak, A., Taylor, A., Signore, J.M. & Bikhari, S.A. (2010, July). *Evaluation of Gencor Green Machine Ultrafoam GX*. NCAT Report 10-03. Final report.
- Middleton, B. & Forfylyow, R.W. (2008, abril). *An evaluation of Warm Mix Asphalt produced with the Doble Barrel Green process*. 7th International Conference on Managing Pavement Assets. Transportation Research Record, N.º 2126 (pp. 19-26) (Icmpa), Calgary.
- Nortjé, W., Lewis, A. & Lewis, T. (2011, September). *Full-scale implementation of Warm Mix Asphalt in South Africa*. 10th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa.
- Prowell, B.D. (2007, julio). *Warm Mix Asphalt. The International Technology Scanning Program*. Summary Report. Submitted to American Trade Initiatives.
- Jones, D., Wu, R., Barros, C. & Peterson, J. *Research findings on the use of Rubbriized Warm-Mix Asphalt in California*.
- Hicks, R.G., Cheng, D. & Teesdale, T. (2010). *Assessment of Warm Mix technologies for Use with Asphalt Rubber Paving applications*. California Integrated Waste Management Board – CIWMB. Tech Report 2010-103 TM. 5-14-2010.
- Vargas-Nordbeck, A. & Timm, D.H. (2013). *Physical and structural characterization of sustainable asphalt pavement sections at the NCAT test track*. NCAT Report 13-02. National Center for Asphalt Technology, Auburn University. February 18.
- Croteau, J-M. & Tessier, B. (2008). *Warm Mix Asphalt Paving Technologies: a Road Builder's perspective*. Paper prepared for presentation at the "Warm Asphalt Technology as a Sustainable Strategy for Pavements" Session of the 2008 Annual Conference of the Transportation Association of Canada.
- Hajj, E., Chia, Ch., Sebaaly, P. E., Kasozi, A. M. & Gibson, S. (2011). *Properties of Foamed Warm-mix Asphalt incorporating Recycled Asphalt Pavement from two field projects – case studies*. Revised: August 22.
- Hill, B. (2011). *Performance evaluation of Warm Mix Asphalt mixtures incorporating Reclaimed Asphalt Pavement* - Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of science in Civil Engineering in the graduate College of the University of Illinois at Urbana-Champaign. Urbana, Illinois.
- O'Sullivan, K. & Wall, P.A. (2009). *The effects of Warm Mix Asphalt additives on Recycled Asphalt Pavement*. A major qualifying project report submitted to the faculty of the Worcester Polytechnic Institute in partial fulfillment of the requirements for the degree of Bachelor of Science. March 6.
- Hanz, A.J. (2012). *Quantifying the Impacts of Warm Mix Asphalt on Constructability and Performance*. A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy (Civil & Environmental Engineering) University of Wisconsin – Madison.
- Gutiérrez, J.C. (2011). *Definición, análisis y aplicabilidad de las mezclas asfálticas en tibio en Chile*. Memoria para optar al título de ingeniero constructor. Chile.
- Kristjánssdóttir, O. (2010, June). *Warm Mix Asphalt Technology Adoption*. NVF 33 Annual Meeting, Trondheim, Norway.
- Tsai, J., Lai Y.J., Tsai & Wang, Z. (2010, June). *Evaluating Constructability and Properties of Warm Mix Asphalt*. Final Report. Georgia Institute of Technology. The Georgia Department of Transportation. FHWA-GA-10-0904.
- Sargand, S., Figueroa, J.L., Edwards, W., Al-Rawashdeh, A. (2009, September). *Performance Assessment of Warm Mix Asphalt (WMA) Pavements*. Ohio Research Institute for Transportation and the Environment (Orite), FHWA/OH-2009/08.
- Nishant Mukeshkumar, Sheth (2010). *Evaluation of selected warm mix asphalt additives*. University of Iowa. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the Master of Science degree in Civil and Environmental Engineering in the Graduate College of The University of Iowa.

32. Diefenderfer, S. D., McGhee, K. K. & Donaldson B. M. (2007, April). *Installation of Warm Mix Asphalt Projects in Virginia*. Virginia Transportation Research Council FHWA/VTRC 07-R25.
33. D'Angelo, J., Harm, E., Bartoszek, J., Baumgardner, G., Corrigan, M., Cowsert, J., Harman, T. et al. (2008, February). *Warm-Mix Asphalt: European Practice*. American Trade Initiatives FHWA-PL-08-007.
34. Santucci, L. (2010). *Warm Mix Asphalt Hits the Road*, Pavement technology update, Technology Transfer Program, Vol. 2, N.º 1.
35. Perkins, S.W. (2009, November). *Synthesis of Warm Mix Asphalt Paving strategies for use in Montana highway construction*. FHWA/MT-09-009/8117-38. Final report. Prepared for the State of Montana Department of Transportation. In cooperation with The U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.
36. Papacostas, A., Sharp, K. & Malone, S. (2013). *Evaluation Protocol for Warm Mix Asphalt*. ISBN 978-1-921991-83-7. Austroads Project No. TT1454. Austroads Publication N.º AP-T231-13, ARRB Group.
37. Worrall, J. & Choi, Y. (2007). *Warm Mix Asphalt (WMA) Review*. ISBN 978-1-921329-37-1. Austroads Project No. TT1220. Austroads Publication N.º AP-T91/07. Austroads technical report.
38. Papacostas, A., Choi, Y., Malone, S. & Sharp, K. (2013). *Laboratory Evaluation of Warm Mix Asphalt Mixes*. ISBN 978-1-921991-82-0. Austroads Project No. TT1454. Austroads Publication N.º AP-T230-13. Austroads technical report.
39. Carbone, T. & Alderson, A. (2010). *Review of the Environmental Aspects of Warm Mix Asphalt*. ISBN 978-1-921709-30-2. Austroads Project N.º TT1454. Austroads Publication N.º AP-T163/10.
40. Papacostas, A., Sharp, K., Patrick, S., Thananjeyan, A. & Simpson, C. (2012). *Field Validation of Warm Mix Asphalt Pavements*. ISBN 978-1-921991-56-1. Austroads Project N.º TT1454. Austroads. Publication N.º AP-T214-12. Project ARRB Group.
41. NCHRP (2012). *Special Mixture Design Considerations and Methods for Warm Mix Asphalt: A Supplement to NCHRP Report 673: A Manual for Design of Hot Mix Asphalt with Commentary*. National Cooperative Highway Research Program. NCHRP REPORT 714, Washington, D.C.
42. Campagnoli, S.X. (2008). *Tendencias actuales en la tecnología de los asfaltos espumados*. VI Jornadas Internacionales del Asfalto. Bucaramanga, Colombia.