

# Mezclas asfálticas tibias fabricadas con asfalto espumado

Rey Omar Adame Hernández,  
omar.adame@lasfalto.com.mx

Ignacio Cremades Ibáñez,  
Cremades@surfax.com.mx

Jorge Vázquez Camacho,  
Jorge.vazquez@lasfalto.com.mx

Israel Sandoval Navarro,  
Israel@surfax.com.mx

El asfalto espumado se ha convertido en uno de los métodos más usados para producir mezclas asfálticas tibias, principalmente en los Estados Unidos de Norte América (USA). El proceso de mezclar asfalto caliente y agua fría resulta en una expansión de volumen y reducción de la viscosidad del asfalto la cual produce un mejor cubrimiento de los agregados junto con una mejora en la manejabilidad de la mezcla. En este estudio se utilizó un método de medición de las propiedades de la espuma, el cual mide la expansión, tamaño, cantidad y colapso de ésta durante su proceso y evolución, adicionalmente, se evalúa el uso de un aditivo que mejora sus propiedades, resultando en una espuma estable que mejora las capacidades de esta y las propiedades de desempeño en la mezcla asfáltica.

Los resultados indican que la cantidad de agua tiene un efecto significativo en las propiedades y características de la espuma, mientras que el aditivo mejora la homogeneidad de ésta proporcionándole estabilidad. Finalmente, la mezcla asfáltica tibia se comparó con una mezcla con asfalto espumado con temperatura de una mezcla en caliente y agregados en caliente (temperatura de una mezcla asfáltica en caliente), resultando en términos de desempeño un comportamiento similar entre ambas mezclas asfálticas.

**Palabras Clave:** Asfalto espumado, mezclas asfálticas tibias, coeficiente de expansión, vida media.

Foamed asphalt has become one of the most widely used methods to produce warm asphalt mixes, mainly in the United States of North America. The process of mixing hot asphalt and cold water results in an expansion of volume and a reduction in the viscosity of the asphalt which produces a better coverage of the aggregates together with an improvement in the workability of the mixture.

In this study, a method of measuring the properties of the foam was used, which measures the expansion, size, quantity and collapse of the foam during its process and evolution. Additionally, the use of an additive that improves its properties is evaluated, resulting in a stable foam that improves its capabilities and performance properties in the asphalt mix.

The results indicate that the amount of water has a significant effect on the properties and characteristics of the foam, while the additive improves its homogeneity by providing stability. Finally, the warm asphalt mix was compared with a mixture with foamed asphalt with the temperature of a hot mix and hot aggregates (temperature of a hot asphalt mix), resulting in performance terms similar behavior between both asphalt mixes.

**Keywords:** Foam asphalt, warm asphalt mixes, expansion ratio, high life.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las mezclas asfálticas tibias (MAT o Warm Mix Asphalt,

WMA) son un conjunto de tecnologías desarrolladas en Europa como consecuencia del tratado con Kyoto y la Comunidad Económica Europea en 1997, con el objetivo de disminuir la

## Mezclas asfálticas tibias fabricadas con asfalto espumado

producción de los gases del efecto invernadero. En los Estados Unidos la National Asphalt Pavement Association (NAPA), en cooperación con la Federal Highway Administration (FHWA) introdujeron las MAT en el World Asphalt Show & Conference del 2004, en Nashville, TN., como aporte a estos problemas ambientales (Goh et al. 2007).

tación han sido motivadas debido a los beneficios económicos, ambientales e ingenieriles para obtener disminuciones en el proceso, esto en términos del consumo de energía, olores y emisión de gases durante la fabricación y colocación de la mezcla asfáltica, además de extender el tiempo disponible de traslado de la planta a la obra, prolongar la pavimentación en cam-

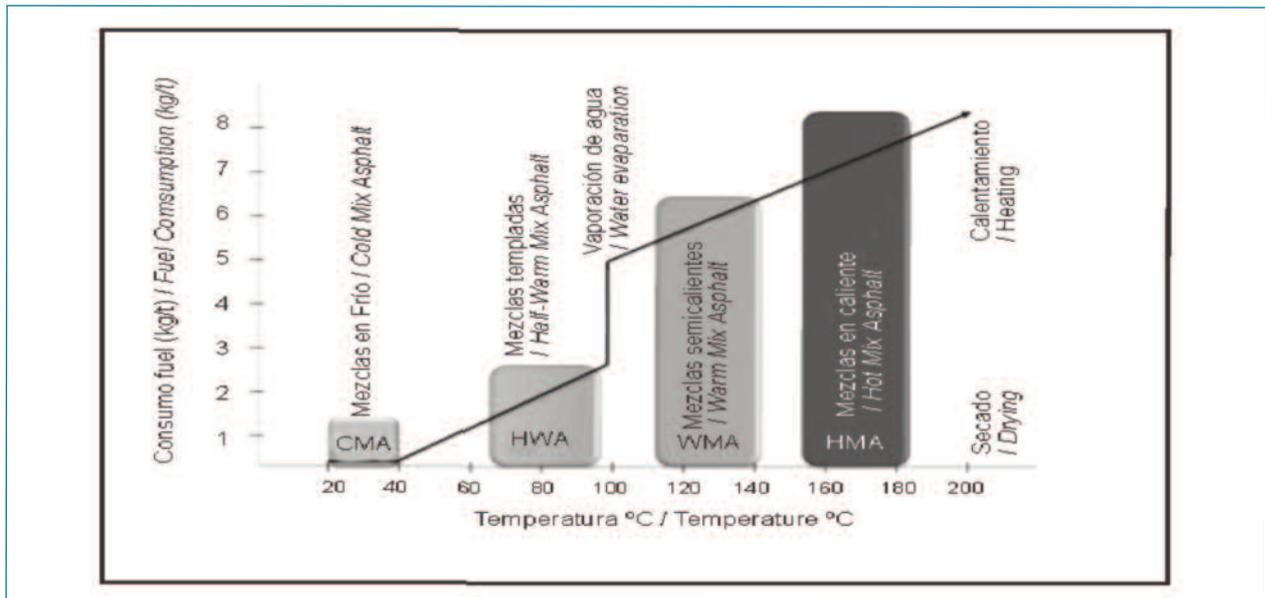


Figura 1. Clasificación de las mezclas asfálticas por temperatura de producción (Goh et al. 2007)

Los gases generados en la producción de mezclas asfálticas en caliente tienen un efecto en la atmósfera y en el cambio climático, además, estas pueden causar daños en la piel por quemaduras a los trabajadores que las manipulan. Gracias a las grandes cualidades de las mezclas asfálticas tibias, estos efectos negativos para la atmósfera y el medio ambiente pueden disminuir significativamente, principalmente por la reducción de temperatura durante el proceso de fabricación. El objetivo de estas tecnologías es bajar las temperaturas de trabajo, principalmente de compactación. Para ello existen diferentes técnicas que buscan reducir la viscosidad del ligante asfáltico y que pueden aplicarse tanto en mezclas continuas como discontinuas. Dichas técnicas se separan en cuatro categorías definidas como:

- Reducción de la viscosidad utilizando aditivos orgánicos.
- Asfaltos espumados.
- Tecnologías con bases acuosas.
- Uso de emulsiones asfálticas.

La reducción de las temperaturas de fabricación y compac-

po y la disminución de la oxidación del asfalto, el uso de mezclas asfálticas tibias reduce las temperaturas de trabajo sin afectar a las propiedades, calidad y desempeño de la mezcla asfáltica resultante.

Con respecto a la tecnología del asfalto espumado, estudios previos muestran que una varilla graduada es comúnmente usada para caracterizar y medir las propiedades del asfalto espumado en términos de coeficiente de expansión ( $ER_{max}$ ) y vida media (HL).  $ER_{max}$  es definido como la relación del volumen máximo de asfalto espumado comparado con el volumen ocupado por la misma masa de asfalto sin espumar y sin agua; HL es definido como el tiempo requerido para la espuma de asfalto para colapsar a la mitad del volumen máximo. Sin embargo, este método presenta algunas limitaciones, sobre todo en la lectura de ambos parámetros debido a que las burbujas pueden confundir la medición de la espuma sobre la varilla.

## 2. ANÁLISIS EXPERIMENTAL

### 2.1 Materiales usados en este trabajo

Los agregados pétreos utilizados en este trabajo son procedentes de las zonas aledañas a la Ciudad de México y de origen volcánico. Mientras que el asfalto es procedente de la refinería de PEMEX-Salamanca clasificado con un grado de desempeño PG 64-16. Las mezclas asfálticas fueron diseñadas con el Método Marshall, 50 golpes por cara.

### 2.2 Fabricación y medición de las características del asfalto espumado

El método utilizado para producir mezclas de asfalto espumado consiste en la utilización de un equipo de laboratorio para espumar asfalto, el cual es capaz de dosificar una cantidad de agua y de asfalto de manera simultánea en una proporción establecida, resultando una expansión instantánea, debido al choque térmico entre ambos componentes. Posteriormente, la espuma resultante se deposita sobre una vasija de acero previamente calentada y que contiene el material pétreo a la temperatura de trabajo.

### 2.3 Calibración en la dosificación de asfalto

Un paso importante en el proceso es controlar el tiempo de descarga del asfalto espumado que va a ser adicionado al material pétreo. Para calibrar la descarga se grafica el peso del asfalto que genera el equipo con respecto al tiempo. Los datos se obtienen pesando la cantidad de asfalto obtenido en diferentes tiempos de descarga. La cantidad de agua que va a ser adicionada se determina mediante el uso del medidor de flujo. A continuación, el mezclador se coloca directamente debajo de la salida de la cámara de expansión de formación de espuma y se mezcla con el agregado.

### 2.4 Evaluación de las propiedades de la espuma

Para dar soporte a este estudio, el primer paso fue la evaluación del espumado de asfalto provocado solamente con la adición de agua a diferentes concentraciones. Se determinó el tiempo de vida media de la espuma y su coeficiente de expansión en un rango de concentraciones entre 0.5 y hasta 4.0% de agua sobre el peso del asfalto determinando la concentración óptima de agua para espumar. La evaluación se realizó en condiciones de laboratorio con el uso de la planta de espumado.



Figura 2. Equipo de espumado completo que lo conforma: dispositivo de espumado, mezclador de aspas y distanciómetro láser (Fuente: elaboración propia) Lasfalto S de R. L. .

## Mezclas asfálticas tibias fabricadas con asfalto espumado

En la figura 3 se observa la capacidad mínima en las propiedades de espumado con agua presentando un tiempo de vida media inferior a 20 segundos, este se considera como un tiempo insuficiente para realizar un buen mezclado durante el proceso de producción de mezcla asfáltica tibia que requiere de al menos 30 segundos para lograr una incorporación homogénea (Jenkins et al, 1999), poniendo de manifiesto que es necesaria la incorporación de un aditivo que permita prolongar el tiempo de vida media de la espuma y así aumentar la probabilidad de contacto del asfalto con el pétreo. Para este trabajo se dibujó una gráfica de equilibrio entre el porcentaje de agua vs propiedades de la espuma (HL y Er), para este caso la intersección de ambas condiciones es de 2.8% de agua. Sin embargo, para esta investigación fue más importante el tiempo de vida media (tiempo disponible para mezclarse con el agregado). Por lo tanto, el porcentaje de agua seleccionado fue de 2% de agua con respecto al peso del asfalto.

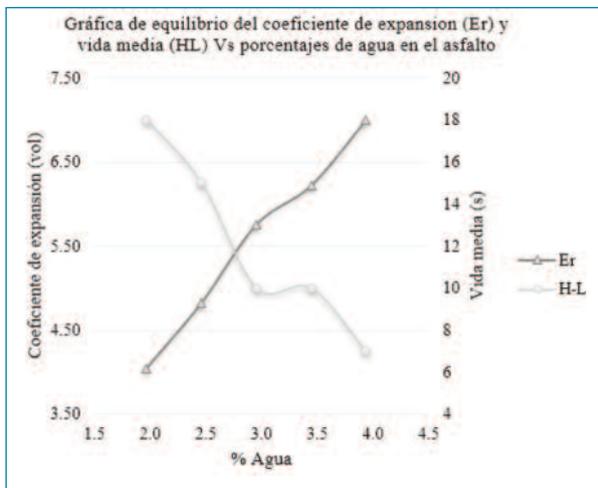


Figura 3. Gráfica de equilibrio de la vida media y coeficiente de expansión en relación con el porcentaje de agua,

### 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con el objetivo de mejorar las características del espumado y por consiguiente las condiciones de producción y desempeño de la mezcla asfáltica, se realizaron pruebas utilizando 8 aditivos diferentes para asfalto espumado, además del agua. Se determinaron las propiedades de la espuma obtenida (tiempo de vida media, coeficiente de expansión y homogeneidad de la burbuja) y se compararon con los resultados obtenidos con las características de la espuma generada con agua. Todos los adi-

tivos fueron agregados en el agua para después mezclarse con el asfalto.

El asfalto base o betún utilizado en este trabajo para espumar; está clasificado como un asfalto PG 64-16 (AC-20), este es procedente de la refinería de Pemex-Salamanca, ubicado en el estado de Guanajuato. Cabe mencionar que este asfalto funcionó como base para espumar con cada uno de los aditivos usados en este trabajo.

La medición de las propiedades de la espuma se hizo con la ayuda de un distanciómetro laser, en los métodos tradicionales se usa una varilla para medir la vida media y coeficiente de expansión, sin embargo, este método suele ser complicado para registrar las alturas de la espuma respecto al tiempo, debido a que para el ojo humano es fácil confundir alturas en movimiento y el registro segundo a segundo, para esto, el uso de un distanciómetro laser se vuelve necesario, el distanciómetro se coloca en un punto fijo (en un trípode, ver figura 4) así el láser detecta los cambios de altura en el recipiente en el que se coloca la espuma de asfalto, por lo que hace registros de alturas vs tiempo durante toda la evolución del proceso de espumado, entonces, de esta manera en este proceso se mide el coeficiente de expansión y vida media. Además, paralelo al proceso de medición se hacen fotografías a cada segundo para visualizar el tamaño de la burbuja, estas fotografías son ingresadas a AutoCAD para después ser escaladas en base al diámetro conocido del recipiente donde fue hecho el proceso de espumado, después se contabilizan las burbujas de un mismo tamaño y su respectivo diámetro de cada una de ellas durante todo el proceso (ejemplo: figuras 9 y 10), finalmente, se grafican en el tiempo correspondiente a la vida media de cada asfalto para poder distinguir las calidades de la espuma con diferentes aditivos, siendo este un punto de comparación para cada una de las variables (ver gráfico de figura 11).



Figura 4. Distanciómetro láser para la medición de coeficiente de expansión y vida media del espumado (Fuente: elaboración propia) Lasfalto S. de R. L.

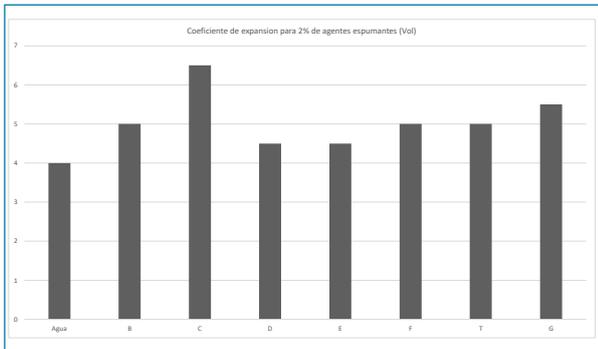


Figura 5. Coeficiente de expansión para un 2% de agua vs 2% agentes espumantes

En la figura 5 se observa que el uso de un aditivo o agente espumante incrementa el coeficiente de expansión de la espuma de asfalto con respecto al obtenido con el agua.

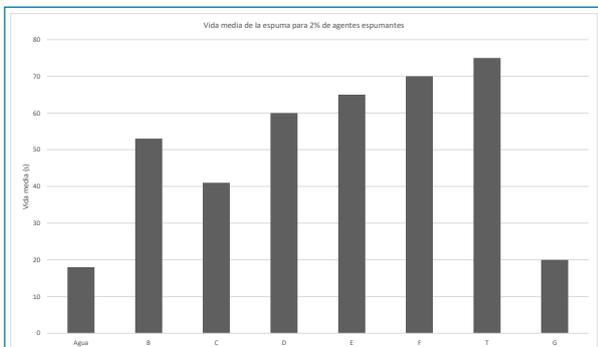


Figura 6. Vida media para un 2% de agua vs agentes espumantes.

En la figura 6 se presenta el tiempo de vida media de la espuma obtenida con los diferentes agentes espumantes con un

2% de agua. En donde es evidente que los productos F y T ofrecen los tiempos de vida media más largos, aunque no necesariamente presenten los coeficientes de expansión más altos. Como se explicó anteriormente, la característica determinante para lograr el completo recubrimiento del pétreo durante el mezclado es el tiempo de vida media de la espuma, por lo que el aditivo identificado como "T" es sobresaliente en este rubro y brinda tiempos de mezclado adecuados para la producción de mezclas asfálticas tibias.

De acuerdo con los resultados anteriores se procedió a determinar la concentración óptima de aditivo T requerida para espumar el asfalto, según el coeficiente de expansión y el tiempo de vida media de la espuma como se muestra a continuación en la figura 7.

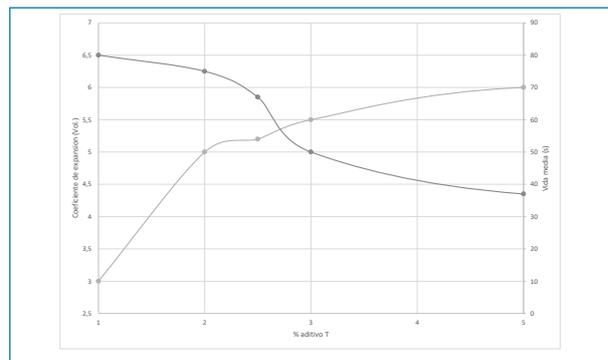


Figura 7. Grafica de equilibrio para definir el contenido óptimo de aditivo T.

El contenido óptimo de uso de aditivo T es de 2.2% sobre el peso del asfalto, teniendo un rango de trabajo desde 2.2% hasta 3.5% sobre el peso del asfalto según lo demanden las características del asfalto utilizado y el diseño de la mezcla.

En la figura 8 se incluye la comparativa del tiempo de vida media y el coeficiente de expansión de la burbuja obtenida con el aditivo T con respecto a los obtenidos con agua, siendo 4.2 y 1.25 veces mayores respectivamente los resultados obtenidos con el aditivo T.

## Mezclas asfálticas tibias fabricadas con asfalto espumado

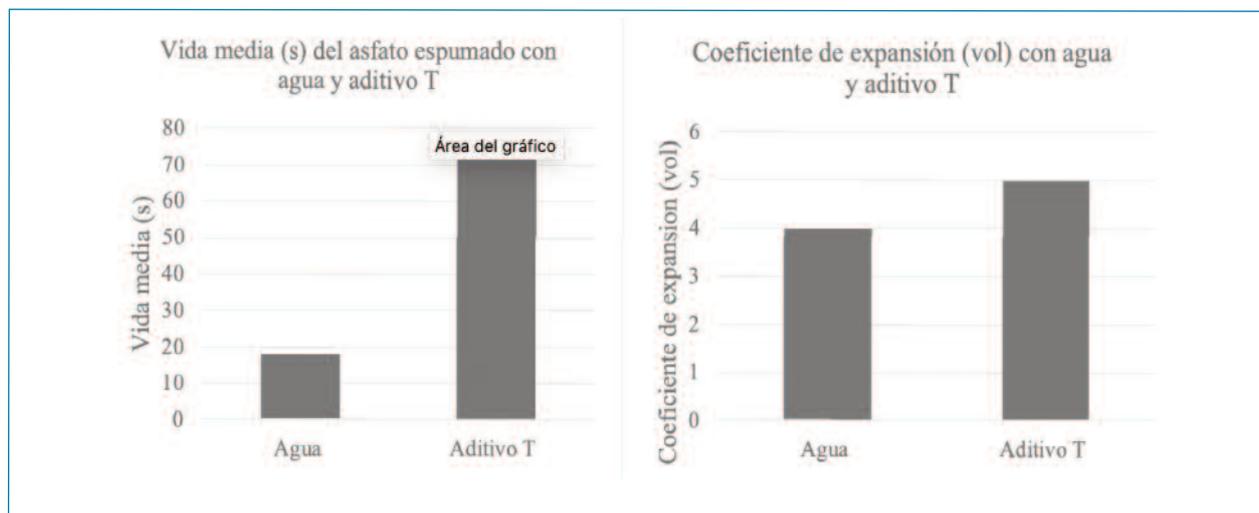


Figura 8. Coeficiente de Expansión (ErMAX) y tiempo de vida media (HL) del asfalto espumado, usando aditivo T vs el espumado con agua

En la tabla 1 se presentan los tamaños de burbuja y su tiempo de vida media al utilizarse diferentes concentraciones del aditivo T. Lográndose una burbuja pequeña y uniforme con larga duración.

bre sobre el agregado. El tamaño de burbuja obtenida con el aditivo T es más pequeña, homogénea. Tales dimensiones generan un incremento en la superficie específica del asfalto que entra en contacto con el agregado pétreo, lo que significa:

Tabla 1. Tiempo de vida y tamaño de las burbujas de material asfáltico usando agua vs aditivo T.

Aditivo T	Concentración respecto al asfalto (%)	Tamaño de la burbuja (mm)	Tiempo de vida (s)
1	1.0	0.50 – 3.0	< 35
2	2.0	0.50 – 3.0	> 75
3	2.5	0.50-3.5	70
4	3.0	0.50 – 4	60
5	3.5	0.50 – 3.0	50
6	4.0	0.50-3.5	< 45
7	4.5	0.50-2.5	< 30
8	5.0	0.50-3.0	< 30
Agua	Concentración de agua sin aditivo		
	2.0	4 – 10	< 20

Las imágenes muestran visualmente el cambio entre el tipo de burbuja y espuma producidas con agua (ver figura 9) y el tipo de burbuja producidas con aditivo el aditivo T (ver figura 10), cuando el asfalto es espumado sólo con AGUA se producen burbujas de diversos tamaños que impiden la estabilidad en la espuma y producen un recubrimiento heterogéneo y po-

1. Una mayor capacidad para cubrir totalmente el agregado pétreo y mejorar el contacto íntimo entre el asfalto y el agregado.
2. Un incremento en el tiempo disponible de mezclado, prolongando la manejabilidad de la mezcla durante el proceso de producción, almacenamiento, transpor-

te y tendido.

3. Un incremento en la compactabilidad de la mezcla permitiendo obtener las propiedades volumétricas de diseño de la mezcla a temperaturas más bajas.

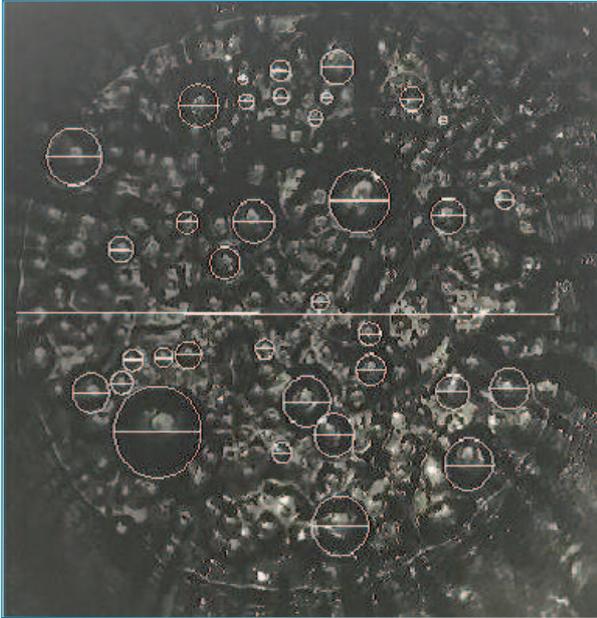


Figura 9. Características de una espuma producida con agua. Se observan burbujas con un tamaño heterogéneo e inestable (Fuente: Fotografías tomadas durante las pruebas, elaboración propia).

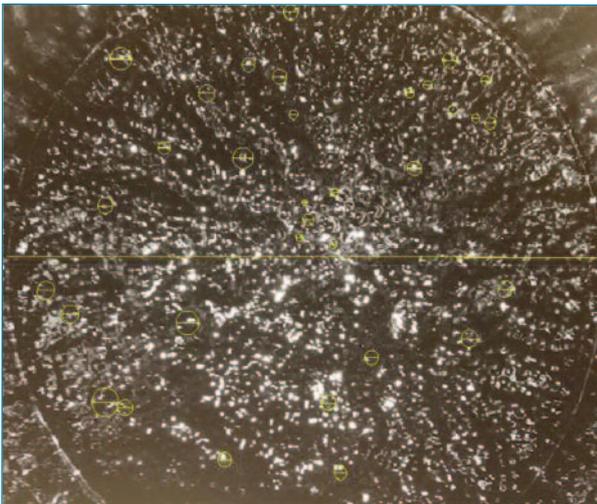


Figura 10. Características de una espuma producida con aditivo T, en la que se observan burbujas con un tamaño homogéneo y estable (Fuente: Fotografías tomadas durante las pruebas, elaboración propia).

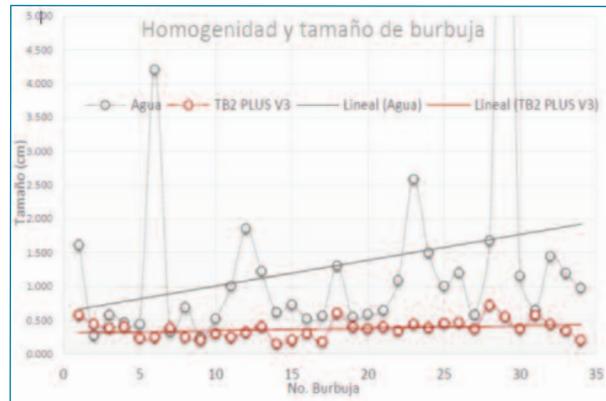


Figura 11. Comparación del comportamiento y distribución de la burbuja en espumado con agua y aditivo T, grafica en la que se representa en el número de burbujas versus el tamaño de burbuja en cm.

### 3.1 Proceso de mezclado y pruebas de desempeño

Una vez seleccionado el aditivo T como el que proporciona las mejores características a la espuma se evaluó su comportamiento durante el mezclado y elaboración de probetas asfálticas para la evaluación de su desempeño. Al mismo tiempo los resultados obtenidos se compararon con los resultados de mezcla asfáltica fabricada con asfalto espumado, pero con las temperaturas de una mezcla en caliente (155 °C) y con mezcla asfáltica tibia espumada sólo con agua.

El proceso de la fabricación de las probetas de mezcla asfáltica tibia para este trabajo comprendió:

1. Secar y calentar el agregado pétreo a una temperatura de 135°C.
2. Calentar el material asfáltico a una temperatura de entre 135°C.
3. Inyectar a presión el aditivo T en la cámara de espumado junto con el asfalto.
4. Mezclar la espuma con el agregado por un tiempo de 3 minutos.
5. Mantener durante 2 horas la mezcla a una temperatura de 125°C con el objeto de simular el proceso de curado (tiempo destinado para que los agregados absorban el asfalto antes del proceso de compactación, además de simular el tiempo de recorrido al sitio de la obra) de la mezcla.
6. Finalmente, compactar la mezcla en el compactador giratorio o compactador Marshall.

El proceso de la fabricación de las probetas de mezcla asfáltica espumada en caliente para este trabajo comprendió:

## Mezclas asfálticas tibias fabricadas con asfalto espumado

1. Secar y calentar el agregado pétreo a una temperatura de entre 155°C.
2. Calentar el material asfáltico a una temperatura de entre 155°C.
3. Inyectar a presión el aditivo T en la cámara de espumado junto con el asfalto.
4. Mezclar la espuma con el agregado por un tiempo de 3 minutos.
5. Mantener durante 2 horas la mezcla a una temperatura de 145°C con el objeto de simular el proceso de curado de la mezcla.
6. Finalmente, compactar la mezcla en el compactador giratorio o compactador Marshall.

La granulometría usada durante este trabajo es el equivalente a una mezcla densa diseñada con el Método Marshall. Bajo esta curva se realizaron pruebas de desempeño como estabilidad y flujo, Módulo resiliente (ASTM D 4123), TSR Tensile Strength Ratio (AASHTO T 283) y desprendimiento por fricción (AMAAC RA-08).

La evaluación de estos parámetros permite determinar la resistencia y durabilidad de la mezcla asfáltica a largo plazo, como consecuencia del proceso de producción y sobre todo de las características del aditivo que permitan incrementar la adherencia entre el agregado pétreo y el asfalto y de esta manera disminuir la susceptibilidad de la mezcla a la humedad.

En la tabla 2 se muestran los resultados obtenidos en tres series de pruebas. Primeramente, se analiza una mezcla en caliente con asfalto espumado que funciona como una referencia para la evaluación. Con la mezcla asfáltica espumada en caliente se alcanzan módulos alrededor de los 3500 MPa. Los datos muestran que las mezclas producidas a temperaturas intermedias con el aditivo T obtienen valores de módulo muy parecidos a los valores obtenidos con las mezclas en caliente alrededor de los 3200 MPa. Las mezclas asfálticas tibias obtenidas con asfalto espumado con agua ofrecen valores de módulo inferiores a 2500 MPa, lo que denota una mezcla más deformable con respecto a las mezclas obtenidas con el aditivo T y con la técnica de mezcla asfáltica en caliente.

La naturaleza de la prueba de estabilidad impide conseguir una diferenciación eminente entre los resultados obtenidos para los tres tipos de mezcla para comparar, mientras que en la evaluación de susceptibilidad a la humedad (TSR) de las mezclas producidas con aditivo T presentan un desempeño deseable por ofrecer un comportamiento superior que aquellas mezclas obtenidas con asfalto espumado con agua. El resultado de la prueba de desprendimiento evidencia un importante aporte del aditivo T ya que aumenta considerablemente la resistencia al desprendimiento a un 16% mientras que las mezclas que no cuentan con este aditivo anti-desprendimiento se ven seriamente afectadas en este parámetro, con desprendimientos al 50%.

**Tabla 2. Pruebas de desempeño a especímenes producidos en Laboratorio con dos contenidos de agua y aditivo diferentes en la columna de agente espumante se indica si se espumo con agua o aditivo.**

Agente espumante	Contenido de asfalto (%)	% agua o Aditivo para espumar	Módulo Resiliente (MPa)	Estabilidad (kg)	Flujo (mm)	TSR (%)	Desprendimiento por fricción (%)
PRUEBA 1							
MAC (Agua) 155°C	6	2.2	3800	>1200	<4	93	> 50
MAT (Agua) 135°C	6	2.1	2108	>1000	<4	87	> 50
MAT + aditivo T- 135°C	6	2.1	3420	>1000	<4	90	14
PRUEBA 1.2							
MAC (Agua) 155°C	6	3.3	3542	>1200	<4	88	> 50
MAT (Agua) 135°C	6	3.1	2495	>1000	<4	72	> 50
MAT + aditivo T 135°C	6	3.0	3135	>1100	<4	83	14
MAT=Mezcla Asfáltica Tibia							
MAC= Mezcla Asfáltica espumada en Caliente							

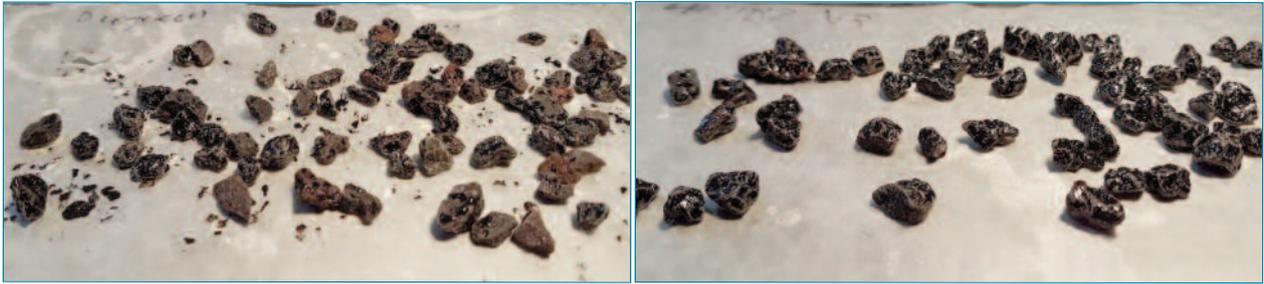


Figura 12. Desprendimientos para el agregado con asfalto espumado con agua (Izq), y espumado con asfalto + aditivo T (Der).

#### 4. CONCLUSIONES

El uso del aditivo T facilita el proceso de mezclado en la producción de mezcla asfáltica tibia porque incrementa la vida media de la burbuja de asfalto más de 4 veces con respecto a la espuma producida sólo con agua. El tiempo de vida media incrementa por encima de los 75 s, tiempo suficiente para lograr un mezclado homogéneo y consecuentemente el recubrimiento total del agregado.

El tamaño de la burbuja obtenida con el aditivo T es diminuto y homogéneo por lo que el área superficial de contacto en el asfalto espumado es mayor y se garantiza el recubrimiento total del agregado durante el mezclado.

Las mezclas asfálticas tibias obtenidas con el aditivo T son mezclas con parámetros de desempeño deseables con valores de módulo alrededor de 3200 MPa, valores cercanos a los obtenidos con mezclas asfálticas espumadas en caliente.

El aditivo T proporciona mejor desempeño y mayor durabilidad a las mezclas asfálticas tibias porque incrementa la resistencia a la humedad. Esto se observa en los mayores porcentajes de TSR con respecto a una mezcla asfáltica obtenida con asfalto espumado solamente con agua y en los valores de desprendimiento que se disminuyen hasta valores cercanos al 16%.

Las mezclas asfálticas tibias disminuyen el proceso de oxidación al trabajar con temperaturas más bajas que las mezclas asfálticas en caliente.

Adicionalmente, el aditivo T favorece el uso de tecnologías limpias y contribuye a la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero sin afectar de manera adversa el desempeño de la mezcla en el pavimento.

#### 7. REFERENCIAS

[1] Yin, F., and Arambula, E. 2014. "Effect of water content on binder foaming characteristics and foamed mixture properties", TRB (2014).

[2] Newcomb, D., Arambula, E., Yin, F., Zhang, J. Properties of Foamed Asphalt for Warm Mix Asphalt Applications. NCHRP Report 807. TRB (2015).

[3] Goh, S., You, Z., Van Dam, T.J.: "Laboratory Evaluation and Pavement Design for Warm Mix Asphalt". Proceedings of the 2007 Mid-Continent Transportation Research Symposium, Center for Transportation Research and Education. Iowa State University, Ames, Iowa (2007).

[4] Yu, X.; Wang, Y.; Luo, Y. 2013. "Impacts of water content on rheological properties and performance-related behaviours of foamed warm-mix asphalt", Construction and Building Materials 48: 203–209. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.018>

[5] Hugo, M. R. D.; Silva, Joel, R. M. Oliveira; Peralta, J. A.; Salah, E.; Zoorob, B. 2010. "Optimization of warm mix asphalt using different blends of binders and synthetic paraffin wax contents", Construction and Building Materials 24(9): 1621–1631. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.02.030>

[6] Iwanski, M.; Mazurek, G. 2013. "Optimization of the Synthetic Wax Content on Example of Bitumen 35/50", Procedia Engineering 57: 414–423. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.054>

[7] Jenkins, K.J., Van de Ven M.F.C. y De Groot J.L.A., (1999). "Characterisation of foamed bitumen", 7th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa, CAPSA 99.

[8] Wirtgen GMBH, (1998). Cold Recycling Manual, Wirtgen Gmbh, Windhagen, Germany.

[9] Macarrone S., Holleran G., Leonard D.J. y Hey S., (1994). "Pavement recycling using foamed bitumen", 17th ARRB Conference Proceedings held in Gold Coast, 15-19 August 1994, Queensland.

[10] JENKINS, K.J. (1999), "Mix design considerations for cold and half - warm bituminous mixes with emphasis on foamed bitumen", unpublished Phd. thesis, University of

Stellenbosh, South Africa.

- [11] ABEL, F. (1978), Foamed asphalt base stabilization, 6th Asphalt Paving Seminar, Colorado State University.
- [12] BISSADA, A.F. (1987), "Structural response of foamed-asphalt-sand mixtures in hot environments, Transportation Research Board" (Transportation Research Record 1115), Washington DC.
- [13] Jenkins, K. J.; Molenaar, A. A. A.; de Groot, J. L. A.; Van de Ven, M. F. C. 2000. "Optimisation and Application of Foamed Bitumen in Road Building". Wegbouwkundige Werkdagen, Doorwerth, Netherlands.
- [14] Kim, Y.; Lee, H. D.; Heitzman, M. 2009. Dynamic Modulus and Repeated Load Tests of Cold In-Place Recycling Mixtures Using Foamed Asphalt, *Journal of Materials in Civil Engineering* 21(6): 279–285. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2009\)21:6\(279\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2009)21:6(279))
- [15] Saleh, M. F. 2007. Cost evaluation of foam bitumen and other stabilization alternatives, *International Journal of Pavement Engineering* 8(2): 157-161. Taylor and Francis. <http://dx.doi.org/10.1080/10298430601149585>
- [16] Iwanski, M.; Chomicz-Kowalska, A. 2012. Moisture and frost resistance of the recycled base rehabilitated with the foamed bitumen technology, *Archives of Civil Engineering*, ISSN 1230-2945, Komitet Inżynierii Lądowej I Wodnej PAN, Vol. 58, nr 2, 2012, 185-198. Available from Internet: <http://versita.metapress.com/content/h304561t24457521/fulltext.pdf>. <http://dx.doi.org/10.2478/v.10169-012-0011-2>
- [17] Iwanski, M.; Chomicz-Kowalska, A. 2013. Laboratory Study on mechanical Parameters of Foamed Bitumen Mixtures in the Cold Recycling Technology, *Procedia Engineering* 57: 433–442, Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.056>
- [18] Akeroyd F.M. y Hicks B.J., (1988). Foamed bitumen road recycling, highways, Volume 56, Number 1933, pp 42-43, 45.
- [19] Csany, 1957. Foamed Asphalt in Bituminous paving Mixes. Highway Research Board Bulletin Volume 10 No. 160. Pp. 108-112.
- [20] Arzhavitina, A. and H. Steckel. 2010. Foams for Pharmaceutical and Cosmetic Application. *International Journal of Pharmaceutics*, 394 (1–2), 1–17.