

TECNOLOGIA DEL ASFALTO ESPUMADO

FOAMED ASPHALT TECHNOLOGY

Por / By Guillermo Thenoux, Andrés Jamet

Resumen

El trabajo constituye un resumen de una amplia revisión bibliográfica del asfalto espumado (también conocido como asfalto celular) y de las mezclas en las que forma parte. El trabajo incorpora las principales aplicaciones de esta tecnología y consideraciones generales para el trabajo con asfalto espumado en la estabilización de suelos y reciclado de pavimentos asfálticos.

Palabras clave: *Asfalto*

Abstract

This paper constitutes a summary of a world wide literature review on foamed asphalt technology (also known as cellular asphalt). This paper incorporates the principal applications of this technology espumado, reciclado en frío de pavimentos asfálticos, estabilización de suelos and considerations for working with foamed asphalt in soils stabilization and recycleof asphaltic pavements.

Keywords: *Foamed asphalt, cold recycling of asphaltic pavements, soil stabilization*

1. INTRODUCCION

El asfalto espumado es una técnica relativamente nueva en su uso y permite producir mezclas asfálticas de un modo muy diferente a los sistemas tradicionales. La mezcla íntima que se produce entre asfalto y agregado es también diferente, pero sin embargo, este tipo de mezclas tiene un comportamiento estructural similar a una mezcla tradicional. Las mezclas con asfalto espumado presentan ventajas especiales frente a mezclas tradicionales, entre éstas las más importantes son las del tipo energéticas y ambientales.

Desde el punto de vista constructivo, el empleo de técnicas modernas especialmente desarrolladas para este tipo de aplicación, le confiere ventajas adicionales en comparación a otro tipo de técnicas constructivas; específicamente admite mayor tolerancia en la especificación de agregados y los procesos constructivos pueden ser de muy alto rendimiento. El asfalto espumado puede ser usado como un agente estabilizador con una variedad de materiales que van desde gravas chancadas de buena calidad hasta suelos marginales con plasticidad relativamente alta y también en materiales asfáltico reciclados. Las mezclas con asfalto espumado pueden ser confeccionadas tanto en terreno como en una planta central.

El presente trabajo corresponde a una síntesis de una amplia revisión bibliográfica sobre asfalto espumado, también llamado asfalto celular.

2. ASFALTO ESPUMADO

2.1 Origen del Asfalto Espumado

El primer investigador en detectar la potencialidad del uso del asfalto espumado en mezclas asfálticas fue el Profesor Ladis Csanyi, en la estación experimental de ingeniería de la Universidad estatal de IOWA en 1956, donde se utilizó un proceso de inyección de vapor para formar la espuma. Los primeros reportes de aplicaciones de asfalto espumado datan del año 1957 y corresponden a aplicaciones realizadas en una carretera estatal de Iowa (USA). En años posteriores se reportan varias otras aplicaciones, entre otras: Arizona (USA) en 1960 y en Nipawin (Canadá) en 1962.

Esta tecnología fue posteriormente mejorada por la organización Mobil Oil en 1968, al adquirir los derechos de la patente de invención del Profesor Ladis Csanyi y desarrollar la primera cámara de expansión que mezcla agua fría con asfalto para generar espuma, transformándose así en un proceso más práctico, económico y menos peligroso.



Desde 1970 la tecnología Mobil Oil de asfalto espumado, ha sido usada en proyectos de estabilización en Australia, Sudáfrica, Inglaterra, Alemania, Francia, Egipto y varios otros países. Simultáneamente, en 1970, Continental Oil Company (CONOCO) obtuvo los derechos de comercialización en USA y desarrolló un laboratorio de asfalto espumado para facilitar el estudio de esta nueva tecnología. Desde entonces ha sido utilizada en varios estados del país del Norte (Colorado, North Dakota, Virginia, Pennsylvania, Michigan, Oklahoma entre otros).

Luego que en 1991 expiraran los derechos de Mobil, se desarrollaron otros sistemas de espumación entre los cuales destaca el método Escandinavo “Nesotec”, actualmente utilizado en Noruega, Suecia y Finlandia.

2.2 Ventajas Energéticas del Asfalto Espumado

La aplicación de asfalto espumado en la reconstrucción de pavimentos asfálticos requiere de un reducido consumo energético en comparación con los métodos tradicionales de mezcla asfáltica en caliente. En un tramo de prueba de un proyecto realizado en Dartford Kent (UK), se estudió la eficiencia energética de dos alternativas de reconstrucción señaladas en la Tabla 1

Tabla 1. Alternativas de reconstrucción

Alternativa de reconstrucción	Estructura de pavimento
Método tradicional	Sub-base granular Base asfáltica Capa de rodado
Asfalto espumado	Base reciclada con asfalto espumado (tecnología en sitio) Capa de rodado

Ambas estructuras de pavimento son equivalentes estructuralmente. Un resumen de los resultados de esta prueba se presenta en la Tabla 2. El consumo de energía para la aplicación con asfalto espumado en esta experiencia fue sólo de un 12% de la requerida por los métodos tradicionales (Akeroyd y Hicks, 1988).

Tabla 2. Eficiencia energética

Reconstrucción con Métodos Tradicionales	
Excavación, carga y transporte de material (21" de espesor)	126
Proceso, transporte y colocación de subbase (13")	74
Proceso, transporte y colocación de base asfáltica (8")	283
TOTAL	483*10² [Joule/m²]
Reconstrucción con asfalto espumado	
Fresado del material existente en terreno	29
Carga y transporte de material desde empréstito	20
Estabilización y compactación del material existente	8
TOTAL	57*10⁶ [Joule/m²]

3. PRODUCCION DEL ASFALTO ESPUMADO

El proceso de producción de asfalto espumado es relativamente simple debido a que principalmente se trata de un proceso físico, regido por leyes básicas de termodinámica.

El asfalto espumado, se produce cuando el asfalto virgen es expandido mediante un proceso físico de intercambio de calor. En dicho proceso se inyecta una pequeña cantidad de agua fría (1 a 3% del peso del asfalto) al asfalto caliente (160 °C - 180 °C) dentro de una cámara de expansión, generando instantáneamente una expansión de gas en forma de espuma.

El proceso de expansión se puede explicar de la siguiente manera: en el momento que las gotas de agua fría toman contacto con el asfalto caliente, se produce un intercambio de energía entre el asfalto y las gotas de agua, lo que eleva la temperatura del agua hasta los 100 °C. La transferencia energética del asfalto sobrepasa el calor latente del agua, generando vapor y una expansión explosiva de éste. Las burbujas de vapor son forzadas a introducirse en la fase continua del asfalto bajo la presión de la cámara de expansión, quedando encapsuladas. El asfalto, junto con el vapor de agua encapsulada, es liberado de la cámara a través de una válvula (dispositivo rociador) y el vapor de agua encapsulada se expande formando burbujas de asfalto contenidas por la tensión superficial de éste. Durante la expansión, la tensión superficial de la delgada capa de asfalto contrarresta la disminución de la presión al interior de las burbujas de vapor, hasta alcanzar un estado de equilibrio (Jenkins et al., 1999).



Debido a la baja conductividad térmica del asfalto y del agua, las burbujas pueden mantener el equilibrio por pocos segundos (10-30 segundos). Este proceso ocurre para una gran cantidad de burbujas. A medida que la masa coloidal (gas/asfalto) se enfría a temperatura ambiente, el vapor en las burbujas se condensa causando el colapso y la desintegración de la espuma. La desintegración de la burbuja (o colapso de la espuma) produce miles de gotitas de asfalto las cuales al unirse recuperan su volumen inicial sin alterar significativamente las propiedades reológicas de éste.

Para la producción de mezclas con asfalto espumado, el agregado debe ser incorporado mientras el asfalto se encuentre en estado de espuma. Al desintegrarse la burbuja en presencia del agregado, las gotitas de asfalto se aglutinan con las partículas más finas (especialmente con aquellas fracciones menores a 0.075mm), produciendo una mezcla asfalto agregado fino, proceso que se denomina dispersión del asfalto. Esto resulta en una pasta de filler y asfalto que actúa como un mortero entre las partículas gruesas.

4. PROPIEDADES FISICAS DEL ASFALTO ESPUMADO

4.1 Volumen de Expansión

Para calcular el volumen de expansión teórico de la espuma de asfalto en laboratorio, se requiere entender cómo se produce el intercambio energético dentro del sistema agua-asfalto-recipiente.

Se puede determinar el volumen de expansión, utilizando la ley universal de gases ($P^xV = n^xR^xT$). Para entender mejor el proceso se presenta el siguiente ejemplo (Jenkins et al., 1999), que representa las condiciones de laboratorio: al descargar una masa de 500 gr de asfalto espumado en un recipiente metálico (de masa 1500 gr) con un 2,5 % de agua (% en peso del asfalto), se obtiene un volumen de 21,2 litros de vapor proveniente del agua inyectada la cual sufre un cambio de fase. Esto, entrega una razón de expansión (razón entre el máximo volumen alcanzado y el volumen sin espumar), de 42,4 para el asfalto, lo cual es 2,5 veces más alto que los valores medidos normalmente bajo condiciones de laboratorio. Las explicaciones para estas diferencias son:

- El vapor de agua no es encapsulado en su totalidad y parte de este se escapa durante el proceso de espumado del asfalto.
- No toda el agua es utilizada para generar espuma, es decir pequeñas cantidades de ésta son aisladas por el vapor dentro de las burbujas de asfalto.
- Otros factores dados por las condiciones de borde de la cámara de expansión y del recipiente.

Debido a que son diversos los factores que determinan la magnitud real de expansión, es que se requiere de varias pruebas de laboratorio para determinar el valor máximo de expansión práctico.

4.2 Tamaño y Espesor Burbuja de Asfalto

Para explicar la interacción física entre el vapor y el asfalto, se analiza una burbuja aislada de asfalto espumado (Figura 1).

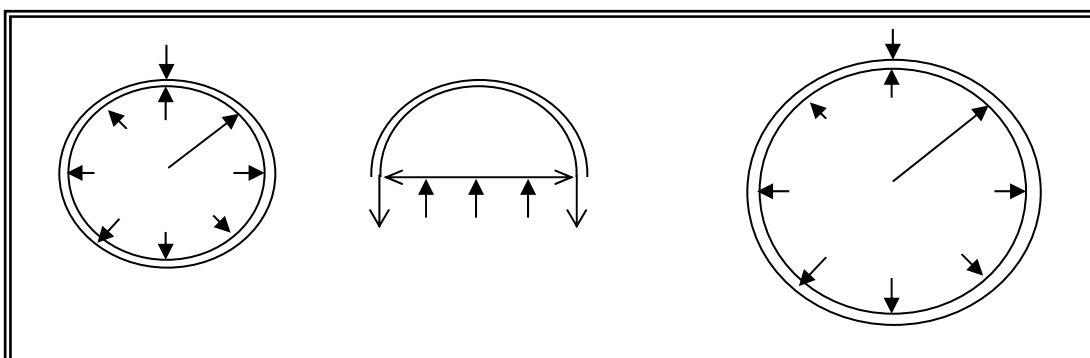


Figura 1. Proceso de expansión de la burbuja de asfalto espumado

Usando la geometría de una esfera, se puede demostrar que los esfuerzos de tracción permanecen constantes a medida que la burbuja se expande (Jenkins, 1999). Sin embargo, existen una serie de factores físicos que limitan la expansión de las burbujas y por ende de la espuma.



Heukelom en 1973, estableció una relación entre la elongación y el módulo de rigidez de los asfaltos con diferentes grados de penetración. Usando esta relación como un indicador de la elongación de la película de asfalto que forma las burbujas, se puede estimar la máxima elongación de la burbuja.

Del monograma de Heukelom y la relación establecida entre el Módulo de Rigidez y elongación, se obtiene una elongación igual a 100 veces el valor del perímetro de la circunferencia. Esto significa que las gotas de agua de 0,1 mm de radio y un perímetro de 0,628 mm, que son encapsuladas en el asfalto, se expandirán hasta 62,8 mm antes de la rotura, es decir una circunferencia de 10 mm de radio. Esto concuerda con las observaciones realizadas en laboratorio (burbujas de 10 a 15 mm). Basado en estos cálculos se determina un espesor crítico para la burbuja (espesor antes del quiebre) entre 100 a 150 Micras (Jenkins et al., 1999).

5. PROPIEDADES EMPIRICAS DEL ASFALTO ESPUMADO

Las propiedades empíricas más importantes del asfalto espumado que se estudian en la actualidad son: Estabilidad, Razón de Expansión, Vida Media e Índice de Espumación

5.1 Estabilidad del Asfalto Espumado

La estabilidad del asfalto espumado se determina por medio del estudio del tiempo que requiere la espuma para colapsar. Dichos estudios son realizados en laboratorio. El quiebre en pruebas de laboratorio ocurre cuando uno de los dos siguientes efectos ocurre primero:

- Reducción en la temperatura del vapor debido al contacto de la película de asfalto con el aire (o el recipiente), que se encuentra a menor temperatura. Las burbujas más grandes, aunque posean teóricamente la misma tensión superficial que sus contrapartes más pequeñas, tienen una mayor área superficial expuesta y por lo tanto experimentarán una mayor disminución de la temperatura lo que las hará colapsar primero (Jenkins et al., 1999).
- Superación del límite de elongación de la película de asfalto. Cuando la presión de vapor al interior de la burbuja es demasiado grande, la película de asfalto se expandirá más allá de su límite de elongación, resultando en su quiebre antes de lograr el equilibrio (Jenkins et al., 1999).

5.2 Razón de Expansión

La Razón de Expansión está definida como la relación entre el máximo volumen logrado en el estado de espuma y el volumen del asfalto sin espumar.

5.3 Vida Media

La Vida Media es el tiempo tomado, en segundos, desde el estado espumado hasta llegar a la mitad del máximo volumen obtenido.

A mayores temperaturas de espumado y mayor cantidad de agua se incrementa la Razón de Expansión pero a su vez disminuye la Vida Media, sin embargo el mejor espumado es generalmente considerado como aquel que optimiza tanto la Razón de Expansión como la Vida Media. Para llevar a cabo dicha optimización es necesario graficar ambas propiedades en un mismo gráfico (Figura 2), para distintas cantidades de agua y temperaturas. En general no existen especificaciones estándar para optimizar estas propiedades, pero es recomendable aumentar levemente el valor óptimo de la Vida Media, a partir del punto de intersección, aún en desmedro de la Razón de Expansión.



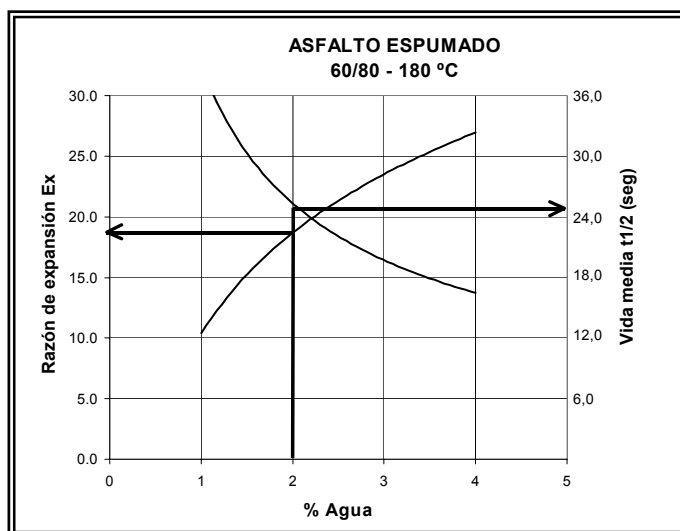


Figura 2. Optimización de la razón de expansión y vida media

Las características de espumado (Razón de Expansión y Vida Media) no son medidas exactas, sino más bien órdenes de magnitud. En general se recomienda una Razón de Expansión entre 8 y 15, y al menos 15 segundos de Vida Media. Por otro lado, mediante el empleo de aditivos activos se pueden obtener valores más elevados, tanto de la Razón de Expansión (superiores a 15) como de la Vida Media (superiores a 60 segundos) (Macarrone et al., 1994). Cuando las características de espumado son extremadamente pobres (una Razón de Expansión menor que 5 y una Vida Media bajo los 5 segundos), es difícil obtener una mezcla aceptable. Las consideraciones deberían entonces estar orientadas a emplear un asfalto de un origen distinto o incluir un agente espumante.

En general, las propiedades de espumación de un asfalto pueden ser afectadas por numerosos factores, entre éstos:

- En laboratorio uno de los parámetros que afectan las propiedades de espumación es el tamaño del recipiente donde estas propiedades son medidas (Ruckel et al., 1982).
- Temperatura del asfalto: Las propiedades de espumación de la mayoría de los asfaltos mejoran con temperatura más altas. Espumas aceptables se consiguen con temperaturas sobre 149 ° C (Abel, 1978).
- Cantidad de agua agregada al asfalto: generalmente la Relación de Expansión aumenta, con un incremento en la cantidad de agua agregada, mientras la Vida Media decrece.
- Presión bajo la cual el asfalto es inyectado en la cámara de expansión. Bajas presiones (menores a 3 bar) afectan negativamente tanto a la Relación de Expansión como a la Vida Media.
- Uso de agentes anti-espumantes, tales como compuestos de silicona, en el asfalto virgen (Abel, 1978).
- Viscosidad del asfalto: En cuanto a la viscosidad del asfalto, los resultados obtenidos en varios estudios no permiten relacionar de forma concluyente esta característica con las variaciones en la Razón de Expansión y Vida Media (Brennen et al., 1983).

5.3 Índice de Espumación

En la actualidad, el asfalto espumado se caracteriza mediante sus propiedades empíricas (Razón de Expansión y Vida Media). Estudios actuales demuestran que estos dos parámetros y la manera en la cual ellos son generalmente determinados no son suficientes para una adecuada caracterización del asfalto espumado (Jenkins et al., 1999). Ninguno de estos dos parámetros permiten establecer la habilidad de la burbuja para ser mezclada con el agregado mineral.

El Índice de Espumación se define como el área bajo la curva de la Razón de Expansión y Tiempo de Colapso (Jenkins et al., 1999). La curva que se obtiene de esta gráfica (Figura 3) corresponde a la curva de colapso, la cual es un indicador del tiempo disponible para el mezclado. El área A formada por la intersección de la curva, el eje de las ordenadas y la recta correspondiente a una razón de expansión 4.0 se conoce como Índice de Espumación. La Razón de Expansión 4.0 es considerada como la mínima para obtener mezclas con propiedades consideradas como aceptables (Shell Bitumen, 1990). Este índice no es utilizado en la actualidad en los métodos de diseño de mezclas.



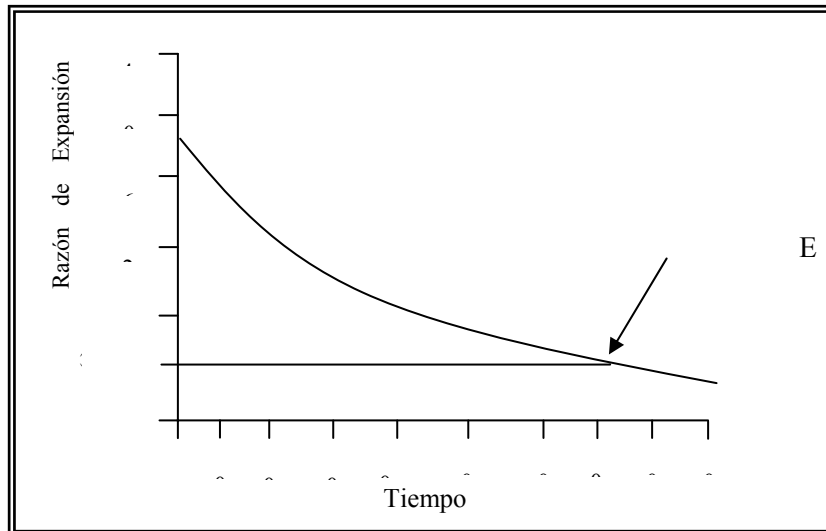


Figura 3. Índice de espumación (IE), donde $IE = A$

6. PROPIEDADES MECANICAS DE LAS MEZCLAS DE ASFALTO ESPUMADO

Las propiedades mecánicas más utilizadas para caracterizar las mezclas de asfalto espumado son: CBR, Tracción Indirecta, Módulo Resiliente, Compresión no Confinada, Estabilidad Marshall y Resistencia a la Fatiga.

Las propiedades mecánicas son susceptibles a la humedad, sin embargo existen ciertos aditivos como la cal o el cemento que reducen esta susceptibilidad (Castedo y Wood, 1983), al igual que elevados contenidos de asfalto, debido principalmente a la reducción de la permeabilidad.

Las mezclas con asfalto espumado disminuyen el valor de sus propiedades mecánicas con el incremento en la temperatura, pero son menos susceptibles que las mezclas asfálticas en caliente. A temperaturas superiores a los 30 ° C, las mezclas con asfalto espumado poseen un Módulo Resiliente más alto que las mezclas asfálticas en caliente equivalentes (después de 21 días de curado a temperatura ambiente) (Bissada, 1987).

Una gran mayoría de las investigaciones y estudios emplean los parámetros: Tracción Indirecta, Módulo Resiliente y Resistencia a la Fatiga:

a) Tracción Indirecta

Para un buen comportamiento en terreno las mezclas deben tener como mínimo una resistencia a la tracción indirecta de 100 Kpa, para probetas de laboratorio ensayadas bajo condiciones de saturación y un mínimo de 200 Kpa en condición seca.

b) Módulo Resiliente

Del mismo modo que todos los materiales viscoelásticos, el Módulo Resiliente de las mezclas con asfalto espumado dependen del tiempo de carga, del nivel de esfuerzo y la temperatura. Los valores medios que alcanzan mezclas correctamente dosificadas, pueden ser comparados con aquellos obtenidos en materiales tratados con cemento, pero con la ventaja de la mayor flexibilidad y mayor resistencia a la fatiga.

c) Resistencia a la Fatiga

Las características de resistencia a la fatiga de las mezclas con asfalto espumado son similares a aquellas obtenidas en mezclas asfálticas en caliente (Maccarrone et al., 1993).

Como una aproximación para el diseño estructural de las capas estabilizadas, se presenta en la Tabla 2 algunos valores propuestos por WIRTGEN S.A. para las propiedades mecánicas de las mezclas con asfalto espumado (Wirtgen GMBH, 1998).



Tabla 3. Propiedades Mecánicas para distintos tipos de mezclas

Material	% Asfalto	Tracción Indirecta (Kpa)	Módulo Resiliente (Mpa)
RAP/Chancado(50/ 50)	1,5 - 3	350 – 800	2500 – 5000
Chancado	2,5 - 4	400 – 900	3000 – 6000
Grava Rodada	3 - 4,5	250 – 500	2000 – 4000

7. CONSIDERACIONES bAsicas para el DISEÑO DE MEZCLAS

En esta sección se presenta un resumen de los aspectos más importantes a considerar en el diseño de una mezcla con asfalto espumado. Estos son:

- a) Elección del grado del asfalto.
- b) Temperatura del asfalto y porcentaje de agua de inyección
- c) Propiedades de los agregados
- d) Contenido óptimo de asfalto
- e) Condiciones de humedad
- f) Condiciones de curado
- g) Condiciones de temperatura de los agregados

a) Elección del grado del asfalto

En general, los asfaltos blandos tienen mejores características de espumación, sin embargo no existen diferencias apreciables entre las propiedades de espumación medidas en relación al grado de asfalto empleado (Lee, 1981). La base espumada es siempre la segunda capa, por lo cual dependiendo del tipo de carpeta de rodado (tratamientos de superficie tipo sellos o carpetas estructurales) el efecto de la temperatura ambiente en conjunto con las cargas de tránsito puede ser más o menos influyente (este efecto se encuentra actualmente en estudio). El proceso de envejecimiento instantáneo del espumado puede ser suficiente para otorgar las propiedades viscoelásticas requeridas, por lo tanto la elección del grado del asfalto puede ser eventualmente sólo función de las propiedades de la espuma (el estudio del envejecimiento instantáneo del asfalto espumado se encuentra en etapa de estudio).

b) Temperatura del asfalto y porcentaje de agua de inyección

La temperatura del asfalto y el porcentaje de agua a inyectar se determinan en función de la Razón de Expansión y Vida Media. El porcentaje de agua de inyección es independiente del agua empleada para la compactación de la mezcla.

c) Propiedades de los agregados

Las investigaciones realizadas, muestran que una gran variedad de agregados pueden ser mezclados con asfalto espumado. Esta variedad incluye áridos chancados, arena arcillosa, RAP y otros materiales tales como escorias. Sin embargo, algunos tipos de materiales (principalmente el RAP) requieren ser mezclados con cemento o cal, para incrementar su contenido de finos y mejorar las propiedades de la mezcla. En la Figura 4 se indica la clasificación de materiales granulares empleados para estabilización de suelos con asfalto espumado, realizada por Akeroyd y Hicks en 1988, para Mobil Oil.



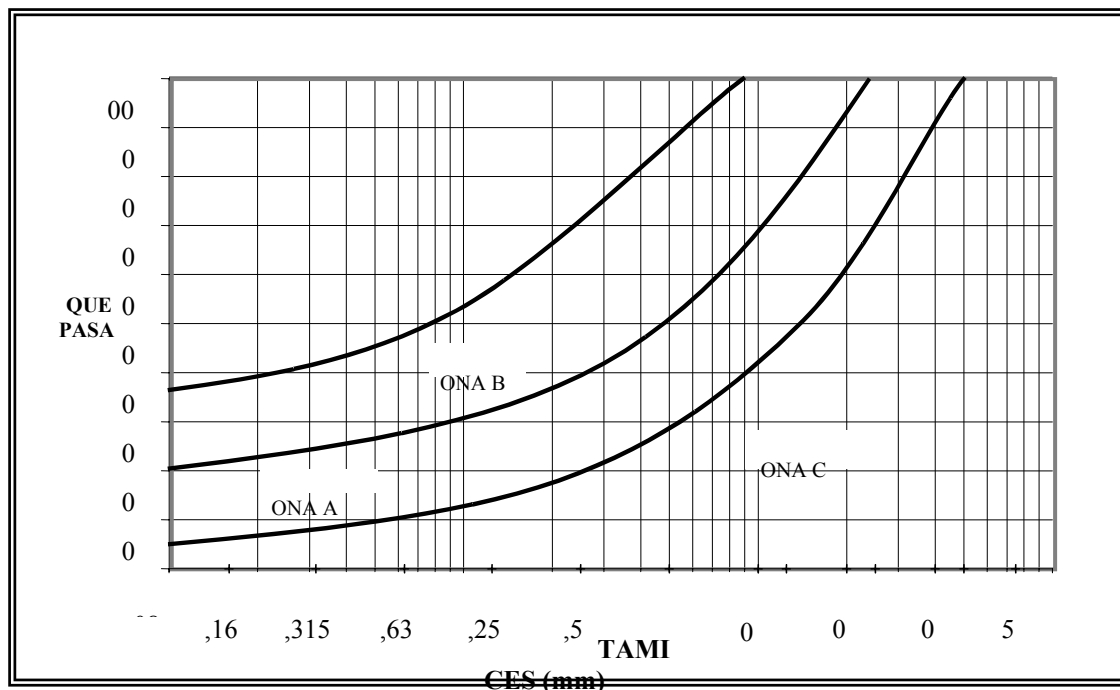


Figura 4: Clasificación de materiales granulares (Akeroyd y Hicks, 1988)

Los materiales incluidos en la Zona A de esta clasificación, han demostrado ser apropiados para ser empleados en la estabilización de carreteras con tráfico pesado. Los materiales de la Zona B son apropiados para tráfico liviano, pero su comportamiento puede ser mejorado mediante la adición de fracciones gruesas. Los materiales de la Zona C son deficientes en finos y no son apropiados para la estabilización a menos que su graduación sea mejorada mediante la adición de finos (cemento o cal).

El contenido de finos del agregado, es un parámetro de gran importancia y en general debe encontrarse sobre un 5% (Ruckel et al., 1982). La relación entre el contenido de finos y asfalto es crítica, ya que un exceso de asfalto en el mortero generará un incremento en la lubricación lo que resultará en una pérdida de resistencia y estabilidad. Las mezclas con altos porcentajes de finos poseen valores elevados de tracción indirecta (Bissada, 1987).

En general las propiedades mecánicas de las mezclas con asfalto espumado son influenciadas por la trabazón de los agregados más que por la viscosidad del asfalto, lo cual difiere de las mezclas asfálticas en caliente.

d) Contenido óptimo de asfalto

En las mezclas con asfalto espumado, el contenido óptimo de asfalto no puede ser determinado con la precisión de las mezclas asfálticas en caliente, sin embargo una buena aproximación a este valor puede ser obtenida mediante la optimización de sus propiedades mecánicas.

Otra de las aproximaciones al contenido óptimo de asfalto es el uso de la relación asfalto - material fino, debido al importante rol que ésta juega en las propiedades mecánicas de las mezclas. En la Tabla 4 se presenta una serie de valores que pueden ser usados como guía para seleccionar el contenido óptimo de asfalto en función del contenido de finos (Csir Transportek, 1999). Otra propuesta abarca un contenido de asfalto de 3,5 % para 5% de finos hasta un contenido de asfalto de 5% para 20% de finos (Akeroyd, 1989), sin embargo esta propuesta no es válida para todos los tipos de materiales debido a las distintas características de absorción de cada uno de ellos.



Tabla 4. Contenido de asfalto en función del % de finos

% Pasa Tamiz 4.75 mm	% Pasa Tamiz 0.075 mm	% Asfalto Espumado
< 50 (Gravas)	3 - 5	3
	5 - 7.5	3.5
	7.5 - 10	4
	> 10	4.5
> 50 (Arenas)	3 - 5	3
	5 - 7.5	3.5
	7.5 - 10	4
	> 10	4.5

e) Condiciones de humedad

El contenido de humedad durante el proceso de mezclado y compactación es considerado por muchos investigadores como el criterio de diseño más importante en las mezclas con asfalto espumado. La relación Humedad - Densidad debe ser considerada en el diseño de la mezcla (Ruckel et al., 1982) Una insuficiente cantidad de agua resultará en una inadecuada dispersión del asfalto, mientras que un exceso de agua incrementará el tiempo de curado, reduciendo la resistencia de la mezcla. El contenido óptimo de humedad varía, dependiendo de las propiedades de la mezcla que se requieren optimizar (resistencia, densidad, etc.).

Investigaciones realizadas por Mobil Oil, sugieren que el contenido óptimo de humedad, es aquel que maximiza la pérdida de volumen (70% - 80% de la humedad óptima AASHTO de los agregados). Las mezclas con bajas densidades son consecuencia de bajos contenidos de humedad, lo que se traduce en una inadecuada dispersión del asfalto espumado (Bowering, 1970)

En general, el contenido óptimo de humedad para el proceso de mezclado debe ser aproximadamente un 10 a 20 % mayor que la humedad de compactación, debido a la pérdida que tiene lugar entre ambos procesos (Sakr y Manke, 1985).

f) Condiciones de curado

Las mezclas con asfalto espumado no desarrollan la totalidad de su resistencia hasta que un gran porcentaje de su humedad se pierde después del proceso de compactación. Este proceso se denomina curado y mediante él, la mezcla obtiene gradualmente resistencia en el tiempo, a medida que disminuye el contenido de humedad. Sin embargo, existe evidencia experimental que demuestra que la pérdida de humedad no es un pre-requisito para la obtención de resistencia de las mezclas con asfalto espumado (Lee, 1980).

Aún considerando las discrepancias presentadas, el procedimiento de diseño de mezclas en laboratorio debe simular las condiciones del proceso de curado en terreno, con la finalidad de correlacionar las propiedades de la mezcla en laboratorio con terreno. Debido a que el proceso de curado en terreno se desarrolla durante varios meses, la simulación de estas condiciones de terreno se realiza mediante un proceso acelerado de curado. Existen varios procesos de curado acelerado entre los cuales destacan:

- Periodo de tres días a una temperatura de 60° C (Bowering, 1970), que representa el estado conseguido en terreno después de un año de servicio (Macarrone et al., 1995)
- Secado en horno a masa constante a una temperatura de 40° C.

g) Condiciones de temperatura de los agregados

Distintos investigadores han reconocido la influencia de la temperatura de los áridos en el comportamiento de las mezclas con asfalto espumado. Los esfuerzos se han orientado a determinar la mínima temperatura a la cual los áridos deben encontrarse para evitar una baja dispersión del asfalto en la mezcla. Se determinó que al calentar los áridos se logra incrementar la dispersión del asfalto en la mezcla lo que se traduce en un mejor cubrimiento de los agregados más gruesos, sin embargo los principios que dominan este proceso no han sido explicados en su totalidad.

La temperatura óptima de mezclado para los agregados se encuentra entre los 13 y los 23 °C dependiendo del tipo de agregado, ya que para temperaturas fuera de este rango resultan mezclas de mala calidad (Bowering y Martin, 1976). Las temperaturas empleadas en investigaciones generalmente no superan los 60° C



8. APLICACIONES DEL ASFALTO ESPUMADO

Existen principalmente dos tipos de aplicaciones para el asfalto espumado, el reciclado en frío de pavimentos asfálticos y la estabilización de suelos.

- Reciclado en frío de pavimentos asfálticos: Consiste en la recuperación del material de un pavimento asfáltico existente, el cual es mezclado con asfalto espumado, adiciones (cemento o cal) y agregados nuevos (si es necesario) para formar una base asfáltica que será colocada en el mismo lugar o en otro distinto. La recuperación puede ejecutarse mediante un equipo fresador capaz de disgregar el material o mediante métodos convencionales donde el proceso de disgregación ocurre con posterioridad a la recuperación. En general el material recuperado está formado no sólo por concreto asfáltico disgregado, sino también por agregados aportados por la base y subbase granular existente.
- Estabilización de suelos: Consiste en la estabilización de suelos de relativa baja plasticidad ($IP < 16$) con asfalto espumado en donde los suelos pueden provenir de la recuperación de áridos de un camino sin pavimentar o de nuevos pozos. Principalmente se emplean agregados recuperados cuya granulometría es mejorada por agregados nuevos (si es necesario), ya que uno de los objetivos de esta aplicación es obtener mezclas de bajo costo. El proceso de recuperación de los agregados es similar al descrito para el reciclado en frío de pavimentos asfálticos

Ambas aplicaciones pueden ejecutarse mediante tecnología en sitio y en planta:

- La tecnología en sitio requiere de un equipo fresador-mezclador. Existen varios modelos y configuraciones para este tipo de equipos, pero en general todos poseen un tambor de fresado-mezclado, en el cual el material es removido desde la superficie, triturado, mezclado con el asfalto espumado y extendido. La inyección del asfalto espumado en el agregado se realiza simultáneamente a través de varias cámaras de expansión individuales. Dependiendo de los aditamentos del equipo de reciclado la mezcla puede quedar acordonada, extendida o extendida y nivelada. En este último caso se puede prescindir de motoniveladora.
- En la tecnología en planta el material es fresado, retirado y transportado hasta una planta donde se incorpora el asfalto espumado y se homogeneiza la mezcla. Luego la mezcla se transporta hasta el frente de trabajo, donde es extendida por medio de motoniveladoras o preferentemente con pavimentadoras (ya que no se requerirá de nivelación) para luego ser compactada. Los tipos de plantas utilizadas permiten su instalación en lugares inmediatos al frente de trabajo. Esto, permite reducir significativamente las distancias de transporte de materiales, además la tecnología en planta permite un mejor control de calidad de la mezcla mediante un control de su dosificación.

Tanto en el reciclado en frío de pavimentos asfálticos, como en la estabilización de suelos se coloca sobre la base asfáltica una carpeta de rodado del tipo sello de agregados, lechada asfáltica o una carpeta asfáltica. En caminos de menor importancia, la colocación de la carpeta de rodado puede incluso no ser necesaria.

10. CONCLUSIONES

Las mezclas con asfalto espumado se han transformado en una excelente alternativa para la estabilización de capas estructurales en los pavimentos, debido principalmente a su buen comportamiento, facilidad de construcción, compatibilidad con un amplio rango de tipos de agregados y ventajas energéticas. Sin embargo, como toda nueva tecnología aún quedan aspectos por investigar y acumular experiencia.

Los criterios empleados actualmente para la caracterización del asfalto espumado, corresponden al volumen que puede alcanzar la espuma (Razón de Expansión) y al tiempo disponible para el mezclado antes del colapso de la espuma (Vida Media). Ambos criterios son ampliamente reconocidos como los más importantes en el proceso de producción de la espuma, sin embargo la forma en que son medidos no permite la obtención de valores precisos, sino más bien órdenes de magnitud. Por esta razón se propone investigar nuevas formas para medir estas propiedades y de este modo obtener una caracterización más precisa de la espuma y su habilidad para mezclarse con los agregados.

El criterio empleado actualmente para obtener el contenido óptimo de asfalto de una mezcla con asfalto espumado, corresponde a la optimización de sus propiedades mecánicas, dentro de las cuales la tracción indirecta se presenta como la propiedad más empleada. El ensayo de módulo resiliente puede ser utilizado en la selección del contenido óptimo de asfalto, pero su utilización está más bien dirigida a caracterizar el comportamiento de la mezcla en servicio.

En un proyecto de reciclado en frío de pavimentos asfálticos, especialmente del tipo profundo (Thenoux y García, 1999), el espesor del concreto asfáltico existente en la estructura de pavimento varía considerablemente a lo largo del camino, lo que genera distintas proporciones entre la cantidad de concreto asfáltico recuperado (RAP) y la cantidad de material granular extraído. Por este motivo se recomienda un análisis de sensibilidad del contenido óptimo de asfalto de la mezcla y sus propiedades mecánicas en función de la cantidad de RAP incorporado.



Se considera que la tecnología del asfalto espumado está suficientemente probada y ha sido utilizada ya en varios países desarrollados y en vías de desarrollo, por lo cual es una técnica que tiene un gran potencial para ser considerada en diferentes proyectos viales.

11. BIBLIOGRAFIA

- ABEL, F. (1978), Foamed asphalt base stabilization, 6th Asphalt Paving Seminar, Colorado State University.
- AKERROYD, F.M. (1989), Advances in foamed bitumen technology, Fifth conference on asphalt pavements for Southern Africa, CAPSA 89, 5-9 June 1989, Swaziland.
- AKERROYD F.M. Y HICKS B.J., (1988), Foamed bitumen road recycling, highways, Volume 56, Number 1933, pp 42-43, 45.
- BISSADA, A.F. (1987), Structural response of foamed-asphalt-sand mixtures in hot environments, Transportation Research Board (Transportation Research Record 1115), Washington DC.
- BOWERING, R.H. (1970), Properties and behavior of foamed bitumen mixtures for road building, Proceedings of the 5th Australian Road Research Board Conference, 1970, Canberra Australia.
- BOWERING, R.H., y MARTIN, C.L., (1976), Foamed bitumen production and application of mixtures evaluation and performance of pavements, Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Volume 45, pp 453-477.
- BRENNEN, M., TÍA, M., ALTSHAEFFL, A. y WOOD, L. E. (1983), Laboratory investigation of the use of foamed asphalt for recycled Bituminous Pavements. Transportation Research Board (Transportation Research Record 911), Washington DC.
- CASTEDO, L. Y WOOD, L. E. (1983), Stabilization with foamed asphalt of aggregates commonly used in low volume roads, Low-volume roads 3rd international conference, Transportation Research Board (Transportation Research Record 898), Washington DC.
- CSIR TRANSPORTEK, (1999), Foamed asphalt mixes: mix design procedure, Contract report CR-98/077, Pretoria South Africa.
- 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.
- 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.
- LEE, D. Y. (1980), Treating Iowas marginal aggregates and soil by foamix process. Iowa State University, May 1980
- LEE, D. Y. (1981), Treating marginal aggregates and soil with foamed asphalt, Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Volume 50.
- MACARRONE, S., HOLLERAN, G. y LEONARD, D.J. (1993), Bitumen stabilization - a new approach to recycling pavements, AAPA Members Conference, 1993.
- 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.
- MACARRONE, S., HOLLERAN, G. y KY, A. (1995), Cold asphalt systems as an alternative to hot mix, 9th AAPA International Conference.
- RUCKEL, P.J., ACOTT, S.M. y BOWERING, R.H. (1982), Foamed asphalt paving mixtures: preparation of design mixes and treatment of test specimens, Transportation Research Board (Transportation Research Record 911), Washington DC.
- SAKR, H.A. y MANKE, P.G. (1985), Innovations in Oklahoma foamix design procedures, Transportation Research Board (Transportation Research Record 1034), Washington DC.
- SHELL BITUMEN, (1990), Shell Bitumen handbook, Shell Bitumen, UK.
- THENOUX, G. y GARCÍA, G. (1999), Estudio de técnicas de reciclado en frío: primera parte, Revista Ingeniería de Construcción número 20, Santiago, Chile
- WIRTGEN GMBH, (1998), Cold Recycling Manual, Wirtgen Gmbh, Windhagen, Germany.



Guillermo Thenoux

Ingeniero Civil, M.Sc, Ph.D
Profesor Titular, Departamento de
Ingeniería y Gestión de la Construcción
Pontificia Universidad Católica de Chile
Santiago, Chile

Civil Engineer, M.Sc, Ph.D
Professor, Department of
Construction Engineering and Management
Pontificia Universidad Católica de Chile
Santiago, Chile
gthenoux@ing.puc.cl

Andrés Jamet

Ingeniero Constructor
Estudiante de Doctorado, Departamento de Ingeniería y
Gestión de la Construcción, Pontificia Universidad Católica de Chile,
Santiago, Chile
Profesor, Escuela de Ingeniería en Construcción
Universidad de Valparaíso,
Valparaíso, Chile

Construction Engineer
PhD Student, Department of
Construction Engineering and Management
Santiago, Chile
Lecturer, School of Engineering in Construction
University of Valparaíso
Valparaiso, Chile
aejamet@puc.cl

