

TECNOLOGÍA DEL ASFALTO ESPUMADO Y DISEÑO DE MEZCLA

GUILLERMO THENOUX Z., Ingeniero Civil, MSc, PhD

Universidad Católica de Chile, gthenoux@ing.puc.cl

ANDRÉS JAMET A., Ingeniero Constructor

Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de Chile, aejamet@.puc.cl

RESUMEN

El trabajo presenta una actualización bibliográfica de la tecnología de asfalto espumado (también conocido como asfalto celular), en particular presenta información referida a ensayos de laboratorio y especificaciones de calidad. El trabajo incorpora las principales aplicaciones de esta tecnología en la estabilización de suelos y reciclado en frío de pavimentos asfálticos.

El trabajo presenta un resumen completo del procedimiento de diseño de mezclas para reciclado profundo con asfalto espumado. Se entregan además los resultados de un estudio de sensibilización del contenido de asfalto para un proyecto de reciclado profundo con distintos contenidos de RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) y diferentes espesores de reciclado. Se entregan recomendaciones para el diseño de mezclas en laboratorio.

1. INTRODUCCION

El asfalto espumado es una técnica relativamente nueva en su uso que permite producir mezclas asfálticas de un modo muy diferente a los sistemas tradicionales. Las mezclas producidas con asfalto espumado tienen un comportamiento estructural similar a una mezcla tradicional (Macarrone et. al., 1993), pero difieren en su estructura interna. Las mezclas con asfalto espumado presentan ventajas especiales frente a mezclas tradicionales entre estas las más importantes son las del tipo energéticas (Akeroyd y Hicks, 1988) y ambientales.

Desde el punto de vista constructivo, el empleo de nuevas técnicas y equipos de construcción especialmente desarrollados 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 el asfalto espumado, el diseño de mezclas y las principales aplicaciones de esta tecnología. La

revisión bibliográfica se complementa con un estudio de laboratorio, cuyos principales objetivos son: aplicar el procedimiento de diseño de mezclas con asfalto espumado, comparar dos asfaltos de distinta penetración para la producción de espuma y realizar un análisis de sensibilidad del contenido asfáltico para mezclas con distinto contenido de RAP (Concreto Asfáltico Reciclado), en un proyecto de reciclado profundo (Thenoux y García, 1999) con asfalto espumado.

2. ASFALTO ESPUMADO

2.1 Desarrollo de la tecnología

El origen del asfalto espumado se remonta al año 1956 en la Universidad estatal de IOWA, donde se utilizó un proceso de inyección de vapor para formar la espuma. Esta tecnología fue posteriormente mejorada por la organización Mobil Oil en 1968, al adquirir los derechos de la patente de invención y desarrollar la primera cámara de expansión que mezcla agua fría con asfalto caliente para generar espuma, transformándose así en un proceso más práctico, económico y menos peligroso. A pesar de ser una tecnología desarrollada hace más de 40 años, su uso se masificó sólo a partir del año 1991, al expirar en ese año los derechos sobre la patente de invención de esta tecnología.

2.2 Producción del Asfalto espumado

El asfalto espumado (también conocido como asfalto celular), se logra mediante un proceso, en el cual se inyecta una pequeña cantidad de agua fría (1 a 2% del peso del asfalto) y aire comprimido a una masa de asfalto caliente (160°C - 180°C), dentro de una cámara de expansión (Figura 1), generando espontáneamente espuma.

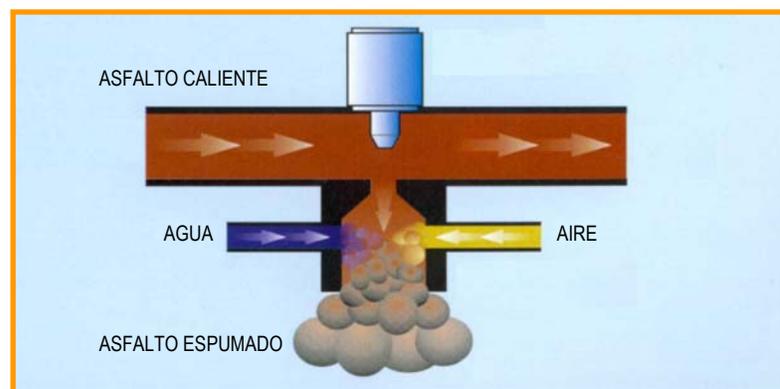


Figura 1. Cámara de expansión

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 , esta transferencia energética genera en forma instantánea vapor y una expansión explosiva del asfalto. Las burbujas de vapor son forzadas a introducirse en el asfalto dentro de la cámara de expansión. El asfalto junto con el vapor de agua encapsulado es liberado desde la cámara a través de una

válvula (dispositivo rociador) y el vapor encapsulado se expande formando burbujas de asfalto contenidas por la tensión superficial de éste 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 espuma 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 originales del asfalto (Jenkins et.al., 1999).

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 0.075 mm), 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. El proceso de dispersión es considerado por muchos autores como fundamental para la obtención de las propiedades mecánicas de las mezclas con asfalto espumado.

2.3 Propiedades del asfalto espumado

El asfalto espumado se caracteriza en función de dos propiedades empíricas:

- Razón de expansión (Ex): Es la razón entre el volumen de asfalto espumado y el volumen del asfalto original. La razón de expansión indica la trabajabilidad de la espuma, y su capacidad de cubrimiento y mezclado con los agregados.
- Vida media ($t_{1/2}$): Es el tiempo, en segundos, que tarda el asfalto en reducir su volumen a la mitad del volumen expandido. La vida media es un indicador de la estabilidad de la espuma y entrega una idea del tiempo disponible para mezclar el asfalto espumado con los agregados antes de que colapse la espuma.

La razón de expansión y vida media son medidas que dependen de muchos factores, entre éstos:

- Temperatura del asfalto: Las propiedades de espumación de la mayoría de los asfaltos mejoran con temperaturas más altas. Espumas aceptables se consiguen con temperaturas sobre 149 ° C (Abel, 1978).
- Dosis de agua inyectada: Generalmente la Razón de Expansión aumenta, con un incremento en la cantidad de agua inyectada, 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 Razón 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).
- 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).

Siendo los principales factores, la temperatura del asfalto y la dosis de agua. 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.

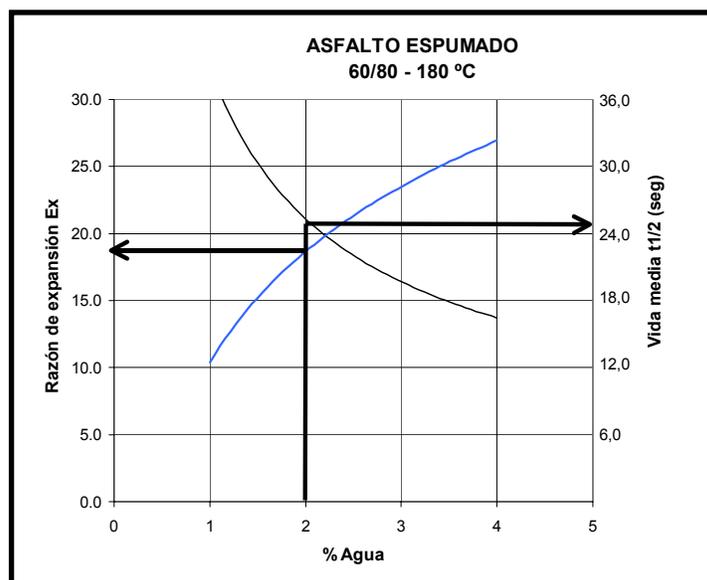


Figura 2. Optimización de la Razón de Expansión y Vida Media

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 8-15, y al menos 15 segundos de Vida Media (Macarrone et. al., 1994).

3. DISEÑO DE MEZCLAS CON ASFALTO ESPUMADO

3.1 Procedimiento de diseño

El procedimiento básico para el diseño de mezclas con asfalto espumado se resume en los siguientes pasos:

- a) Optimización de las propiedades de la espuma
 - b) Caracterización del agregado
 - c) Determinación del contenido óptimo de humedad de la mezcla
 - d) Determinación del contenido óptimo de asfalto
 - e) Caracterización de las propiedades mecánicas de las mezclas
-
- a) Optimización de las propiedades de la espuma

Esta etapa tiene como objetivo determinar la temperatura del asfalto y la cantidad de agua a inyectar que optimicen tanto la Razón de Expansión como la Vida Media. Para llevar a cabo las mediciones en laboratorio de las propiedades de la espuma, se emplea un equipo de producción de asfalto espumado, cuya principal característica es poseer una cámara de expansión, idéntica a la empleada en terreno para producir la espuma de asfalto.

- b) Caracterización del agregado

Debido a la gran variedad de agregados que pueden ser mezclados con asfalto espumado (áridos chancados, arena arcillosa, RAP y otros materiales tales como escorias), estos deben ser caracterizados considerando dos propiedades: su distribución granulométrica y el Índice de Plasticidad.

Una vez obtenida la curva granulométrica del agregado, es comparada con la clasificación mostrada en la Figura 3, desarrollada por Akeroyd y Hicks para Mobil Oil en 1988.

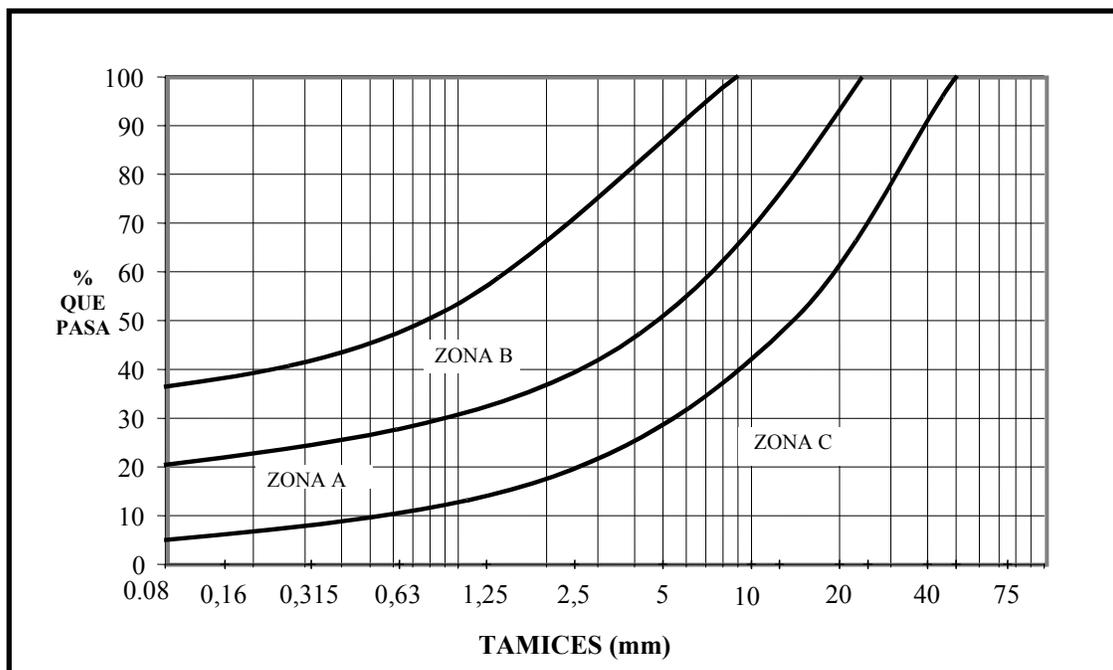


Figura 3. Clasificación de materiales granulares (Akeroyd y Hicks, 1988)

Si el material se encuentra en la Zona A de esta clasificación, es apropiado para ser empleado en 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. El contenido de finos del agregado, es un parámetro fundamental debido a la influencia que tiene en el proceso de dispersión del asfalto y en general debe encontrarse sobre un 5% (Ruckel et al., 1982).

El Índice de Plasticidad es un indicador de la capacidad que tienen los finos para ser mezclados con la espuma de asfalto. Dependiendo de los valores que alcance este índice se recomienda el uso de pequeñas cantidades de cemento de acuerdo con la clasificación mostrada en la Tabla 1 (Wirtgen GMBH, 1998):

Tabla 1. Recomendaciones para la incorporación de cemento a la mezcla con Asfalto Espumado

Índice de Plasticidad	Cantidad de Cemento (% en peso del agregado)
IP < 10	1 %
10 < IP < 16	1.5 %
IP > 16	3 %

El contenido de RAP que posea el agregado, también es un factor que influye tanto en las propiedades estructurales de la mezcla como en el contenido óptimo de asfalto, por lo cual es necesario evaluar esta influencia en laboratorio.

c) Determinación del contenido óptimo de humedad de la mezcla

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 debido a su efecto lubricante sobre las partículas finas durante la dispersión del asfalto. La relación Humedad - Densidad debe ser considerada en el diseño de la mezcla (Ruckel et. al., 1982). Una insuficiente cantidad de agua resultará en un agregado seco y polvoriento lo que provocará que la espuma al colapsar forme grumos de asfalto y no se mezcle adecuadamente con la fracción fina del agregado (Bowering, 1970). Un exceso de agua incrementará el tiempo de curado, reduciendo la resistencia de la mezcla (Ruckel et. al., 1982).

Investigaciones realizadas por Mobil Oil, sugieren que el contenido óptimo de humedad, es aquel que maximiza la densidad de la mezcla (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)

Para el diseño se recomienda como contenido óptimo de humedad, el 75% de la humedad óptima de compactación obtenida mediante el ensayo Proctor Modificado.

d) Determinación del contenido óptimo de asfalto

Para determinar el contenido óptimo de asfalto, deben ser confeccionadas un mínimo de 5 mezclas con distintos contenidos asfálticos (1% – 3 % de asfalto), y evaluar el comportamiento de cada una de ellas en función de la Tracción Indirecta (o tracción por compresión diametral), determinada tanto en estado seco como saturado. El contenido óptimo de asfalto es aquel que maximiza la Tracción Indirecta saturada (CSIR Transportek, 1999).

La Tracción Indirecta (en estado seco o saturado), se determina sobre probetas cilíndricas (100 mm de diámetro por 63.5 mm de espesor) compactadas con 75 golpes del martillo Marshall. Antes de someter a las probetas al ensayo de Tracción Indirecta, estas son curadas durante 72 horas en un horno a 40° C. El estado saturado se logra sumergiendo las probetas en agua durante 24 horas a 25 °C.

e) Caracterización de las propiedades mecánicas de las mezclas

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 mezcla 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

4. 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 (Thenoux y Jamet, 2002).

- 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.

5. INVESTIGACION DE LABORATORIO

5.1 Objetivos de la investigación de laboratorio

La investigación de laboratorio persigue los siguientes objetivos:

- Estudiar y aplicar el procedimiento de diseño de mezclas con asfalto espumado en laboratorio.
- Determinar y comparar las condiciones de temperatura y porcentaje de agua inyectada que optimizan las propiedades de la espuma para dos asfaltos con distinta penetración.
- Realizar un análisis de sensibilidad del contenido óptimo de asfalto para tres mezclas con distinto contenido de RAP.

5.2 Condiciones generales de la investigación de laboratorio

Esta investigación se enmarca dentro de un proyecto de transferencia de la tecnología del asfalto espumado a Chile. La etapa final de este proyecto de transferencia incluye la rehabilitación de un pavimento asfáltico, mediante el reciclado en frío en sitio con asfalto espumado. El proyecto seleccionado, corresponde a la rehabilitación del sector Travesía – Copiapó de la Ruta 5 Norte. En general el pavimento en este sector presenta un avanzado estado de envejecimiento y un deterioro superficial con fallas que comprenden grietas piel de cocodrilo localizadas con pérdidas de fino desde la base granular, condiciones que convierten a este sector en un excelente candidato para el reciclado en sitio con asfalto espumado.

En la rehabilitación del sector Travesía – Copiapó, 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. Esto generó la necesidad de realizar un análisis de sensibilidad en laboratorio del contenido óptimo de asfalto en función de la proporción de RAP versus Base granular que se obtenga a partir del fresado en un espesor predeterminado.

Para que la investigación de laboratorio representara las condiciones existentes en terreno, los materiales granulares y RAP empleados fueron extraídos desde calicatas excavadas en este sector. La base y subbase granular están compuestas por un material no plástico, bien graduado y con un contenido de finos superior al 5%, lo que favorece la dispersión del asfalto espumado. El RAP empleado se considera como un árido negro, donde su contenido asfáltico no aporta al contenido asfáltico total de la mezcla.

5.3 Programa de laboratorio

El programa de laboratorio se desarrolló en las siguientes etapas:

- a) Estudio comparativo de las propiedades de espumación para asfaltos de distinta penetración.
- b) Caracterización del agregado y RAP
- c) Determinación del contenido óptimo de humedad de la mezcla
- d) Determinación del contenido óptimo de asfalto

- a) Estudio comparativo de las propiedades de espumación de asfaltos de distinta penetración.

En esta etapa serán determinadas la temperatura del asfalto y la cantidad de agua de inyección que optimizan la Razón de Expansión y la Vida Media, de dos asfaltos cuyas principales características se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Asfaltos empleados en la investigación

Asfalto	Penetración Máxima	Penetración Mínima	Viscosidad a 135° C
CA 60-80	60mm	80mm	421.5 cP
CA 80-100	80mm	100mm	302.5 cP

El factorial de laboratorio para esta etapa de la investigación se presenta en la Tabla 3. Cada celda del factorial representa el promedio de tres mediciones de la Razón de Expansión y la Vida media para las condiciones de esa celda.

Tabla 3. Factorial Estudio Comparativo

Asfalto	% Agua inyectada	Razón de Expansión				Vida Media (seg)			
		160° C	170° C	180° C	190° C	160° C	170° C	180° C	190° C
CA 60 - 80	1%	X	X	X	X	X	X	X	X
	2%	X	X	X	X	X	X	X	X
	3%	X	X	X	X	X	X	X	X
	4%	X	X	X	X	X	X	X	X
CA 80 - 100	1%	X	X	X	X	X	X	X	X
	2%	X	X	X	X	X	X	X	X
	3%	X	X	X	X	X	X	X	X
	4%	X	X	X	X	X	X	X	X

b) Caracterización del agregado y RAP

El agregado y RAP serán caracterizados mediante su distribución granulométrica (LNV 65 - 84) e índice plasticidad (LNV 90 - 85)

c) Determinación del contenido óptimo de humedad de la mezcla

Se considera que el contenido óptimo de humedad de la mezcla será el 75% de la humedad óptima de compactación del agregado obtenida mediante en ensayo Proctor Modificado (LNV 95 - 85).

d) Determinación del contenido óptimo de asfalto

En esta etapa será analizado el contenido óptimo de asfalto para tres mezclas con distinto contenido de RAP. Las tres mezclas consideradas para esta investigación se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Mezclas RAP – Material granular

	% RAP	% Material granular
Mezcla 1	20	80
Mezcla 2	45	55
Mezcla 3	70	30

Para cada proporción RAP – Material granular considerada, serán confeccionadas 5 mezclas con distintos contenidos asfálticos (1% a 3% de asfalto). De cada mezcla se obtendrán 6 probetas, 3 de las cuales serán ensayadas a Tracción Indirecta (AASHTO T 280) en estado seco y 3 en estado saturado. El óptimo de asfalto será aquel que maximice la Tracción Indirecta saturada

5.4 Presentación y análisis de resultados.

a) Estudio comparativo de las propiedades de espumación para asfaltos de distinta penetración.

Los resultados para los dos tipos de asfalto analizados se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Resultados Optimización Propiedades de Espumación

Asfalto	% Agua inyectada	Razón de Expansión				Vida Media (seg)			
		160° C	170° C	180° C	190° C	160° C	170° C	180° C	190° C
CA 60 - 80	1%	6,0	11,0	11,0	8,0	21,5	13,6	24,0	30,3
	2%	10,7	18,7	17,5	15,3	18,7	7,2	20,1	21,4
	3%	22,0	24,7	23,3	25,3	12,7	5,2	13,8	12,6
	4%	26,7	29,0	27,7	28,7	7,2	4,1	10,0	7,5
CA 80 - 100	1%	6,7	10,0	11,5	9,0	25,3	25,0	25,9	18,6
	2%	16,3	17,3	18,3	20,3	15,2	20,2	18,3	9,4
	3%	23,3	24,3	24,0	25,3	10,6	14,5	13,8	4,7
	4%	29,3	28,0	32,0	30,0	4,7	9,0	10,7	3,9

El análisis de estos datos incluye gráficas del tipo mostrado en la Figura 2, para cada una de las temperaturas estudiadas en cada tipo de asfalto. Al analizar los resultados obtenidos puede concluirse que para ambos tipos de asfalto las condiciones óptimas de temperatura corresponden a los 180° C y el porcentaje óptimo de agua de inyección es de 2% para el asfalto CA 60 – 80, y de 1,9% para el asfalto CA 80 – 100 (Figuras 4 y 5). Las diferencias son mínimas, entre las propiedades empíricas (Razón de Expansión y Vida Media) medidas para los dos tipos de asfalto, especialmente para la temperatura óptima. Para la etapa de la confección de mezclas será empleado un asfalto CA 60 – 80 (calentado a una temperatura de 180° C y con un 2% de agua de inyección).

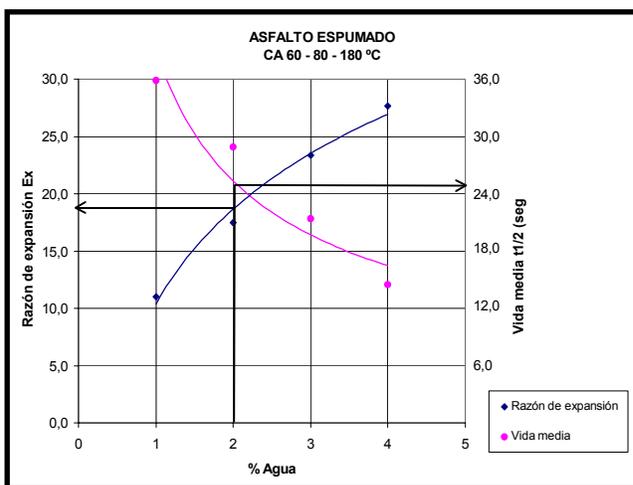


Figura 4. Asfalto CA 60 - 80

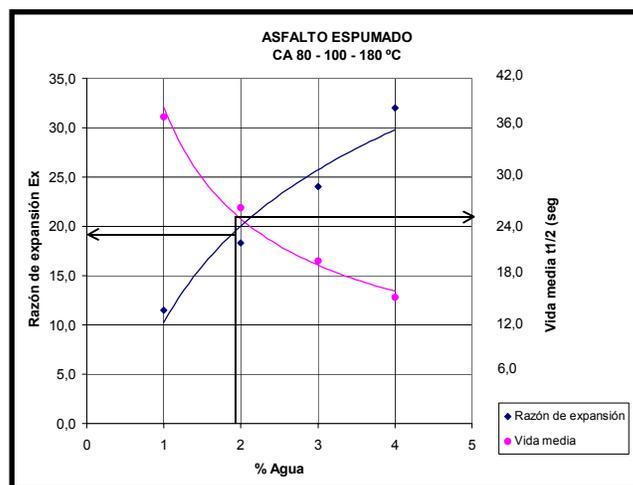


Figura 5. Asfalto CA 80 - 100

b) Caracterización del agregado y RAP

Las granulometrías de las tres mezclas RAP – Material granular empleadas en el estudio, se presentan en las Figuras 6, 7 y 8.

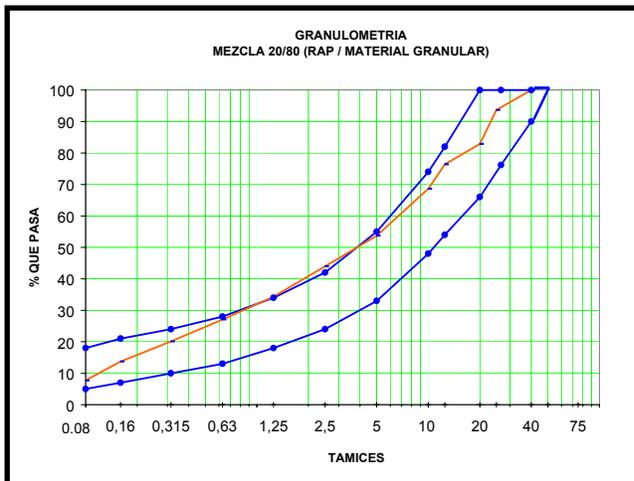


Figura 6. Mezcla 20 – 80
(RAP – Material Granular)

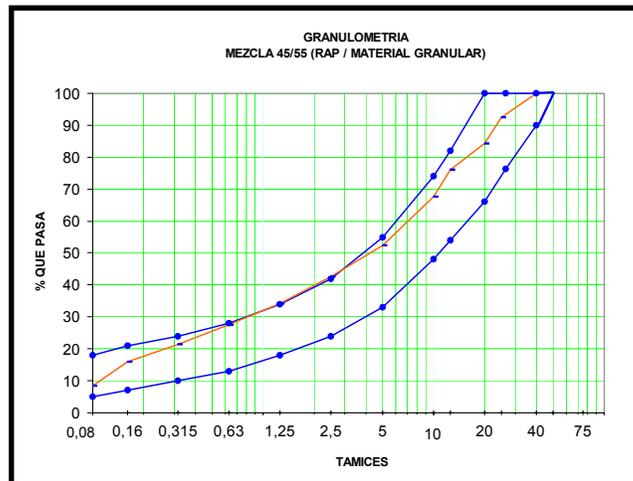


Figura 7. Mezcla 45 – 55
(RAP – Material Granular)

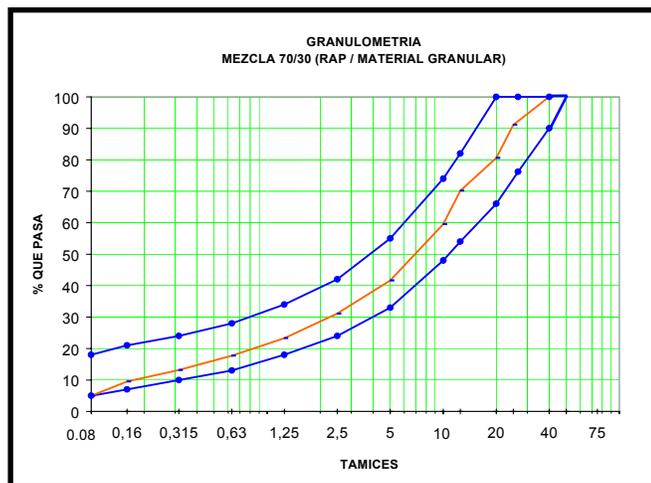


Figura 8. Mezcla 70 – 30
(RAP – Material Granular)

Al analizar las curvas granulométricas de los tres tipos de mezclas (RAP – Material granular) se aprecia que todas se encuentran ubicadas en la zona A de la clasificación de agregados para mezclas con asfalto espumado, por lo que son apropiados para ser empleados en carreteras con tráfico pesado. Además todas poseen un contenido de finos superior al 5% lo que contribuye a una adecuada dispersión de la espuma de asfalto.

El índice de plasticidad para los tres tipos de mezclas y la cantidad de cemento empleada en la confección de las mezclas, se presenta en la Tabla 6.

Tabla 6. Plasticidad de los tres tipos de mezclas RAP – Material granular

Mezcla RAP – Material granular	Indice de Plasticidad	Cantidad de cemento recomendada (%)
20 -80	1	1
45 - 55	1	1
70 - 30	1	1

El material empleado para los tres tipos de mezclas posee una muy baja plasticidad lo que también contribuye a una adecuada dispersión del asfalto.

c) Determinación del contenido óptimo de humedad de la mezcla

El contenido óptimo de humedad de las tres mezclas RAP – Material granular (determinado mediante el ensayo Proctor Modificado), se presenta en la Tabla 7.

Tabla 7. Contenido óptimo de humedad

Mezcla RAP – Material granular	Humedad óptima (%)	Densidad máxima seca (Kg/dm ³)
20 -80	6,7	2,171
45 - 55	6,0	2,218
70 - 30	5,3	2,160

d) Determinación del contenido óptimo de asfalto

Los resultados de la Tracción Indirecta (ITS) en estado seco y saturado para los distintos contenidos asfálticos analizados en las tres mezclas RAP – Material granular se presentan en las Figuras 9, 10 y 11.

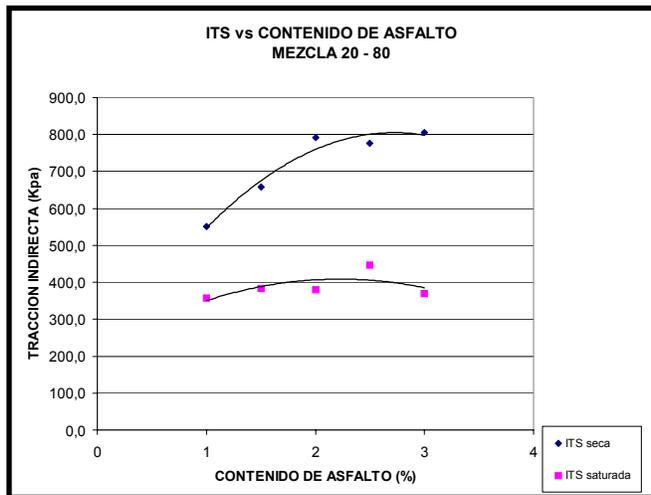


Figura 9. Mezcla 20 – 80
Resultados Tracción Indirecta

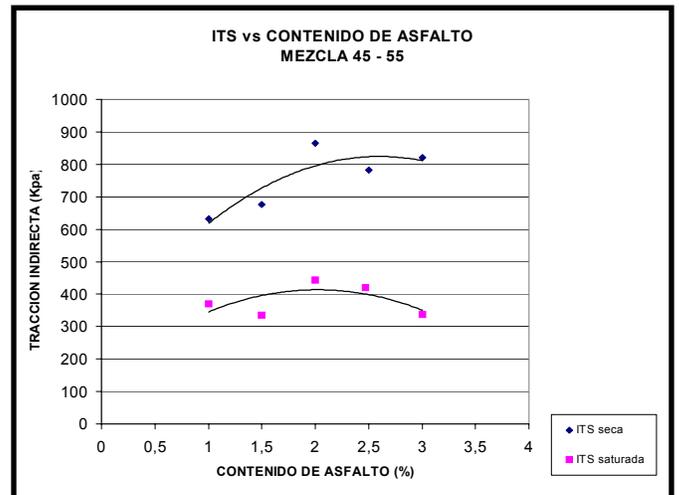


Figura 10. Mezcla 45 - 55
Resultados Tracción Indirecta

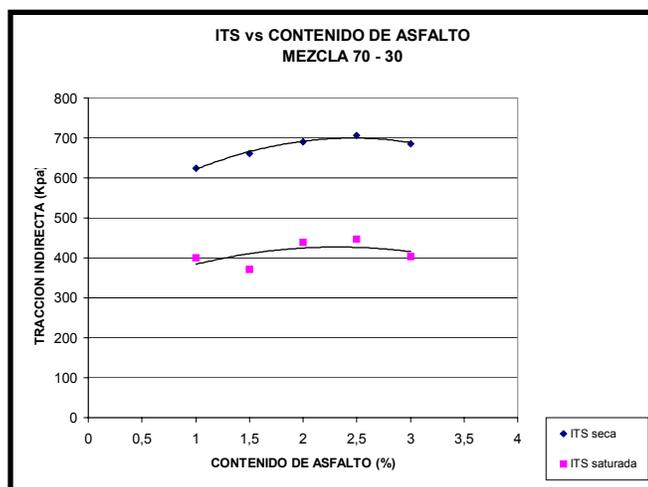


Figura 11. Mezcla 70 - 30
Resultados Tracción Indirecta

Los valores correspondientes a la Tracción Indirecta para el contenido óptimo de asfalto de cada una de las mezclas RAP – Material granular estudiadas, se presentan en la Tabla 8. Además se presenta en esta tabla, el Índice de Resistencia Retenida (IRT) que es un indicador de la resistencia (a la Tracción Indirecta) que conserva la mezcla, después de someterse a las condiciones de saturación.

Tabla 8. Resultados ensayo Tracción Indirecta

Mezcla RAP – Material granular	Contenido óptimo de asfalto (%)	Tracción Indirecta seca (Kpa)	Tracción Indirecta saturada (Kpa)	IRT (%)
20 - 80	2,2	781	401	51,3
45 - 55	2,0	795	417	52,5
70 - 30	2,3	699	426	60,9

Se observa una mínima diferencia entre los contenidos óptimos de asfalto para las distintas mezclas RAP – Material granular, especialmente entre las mezclas con mayor y menor contenido de RAP. No se aprecia una tendencia que indique una marcada influencia de la cantidad de RAP en el contenido óptimo de asfalto.

Los valores de la Tracción Indirecta seca muestran un aumento al disminuir la cantidad de RAP, sin embargo, para los valores de la Tracción Indirecta saturada se produce el efecto contrario. El Índice de Resistencia Retenida aumenta su valor junto con el incremento de la cantidad de RAP, lo que representa una disminución de la susceptibilidad al agua, para las mezclas que contienen una mayor cantidad de RAP.

6. 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 y analizados 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.

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. 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).

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.

El estudio de los dos asfaltos de distinta penetración, permite concluir que no existen diferencias apreciables entre sus propiedades de espumación, sin embargo se requiere analizar un espectro más amplio de asfaltos (mayores penetraciones), para poder determinar con mayor precisión la influencia del grado asfáltico en la Razón de Expansión y Vida Media.

Los resultados del análisis de sensibilidad desarrollado en el presente trabajo indican que el contenido de RAP no influye de manera categórica en el contenido óptimo de asfalto de las mezclas con asfalto espumado, pero sí tiene una influencia en la Tracción Indirecta tanto en estado seco como saturado. El contenido de RAP contribuye a aumentar la tracción indirecta saturada, es decir permite mejorar el comportamiento de las mezclas con asfalto espumado frente a las condiciones de saturación que representan el caso más desfavorable al que puede enfrentarse un pavimento.

7. BIBLIOGRAFIA

Abel, F., (1978). Foamed asphalt base stabilization, 6th Asphalt Paving Seminar, Colorado State University.

Akeroyd 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.

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., 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.

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.

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.

Thenoux G. y García G., (1999). Estudio de técnicas de reciclado en frío: primera parte, Revista Ingeniería de Construcción Pontificia Universidad Católica de Chile, número 20, Santiago, Chile

Thenoux G. y Jamet A., (2002). Tecnología del Asfalto Espumado, Revista Ingeniería de Construcción Pontificia Universidad Católica de Chile, (en imprenta), Santiago, Chile

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