



Laboratorio Nacional de  
Materiales y Modelos Estructurales

## Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)

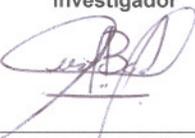
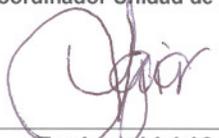
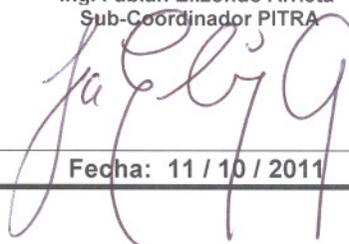
Proyecto: LM-PI-UI-007-11

# **EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE BASES ESTABILIZADAS CON ASFALTOS ESPUMADOS EN TRAMOS DE PRUEBA**

Preparado por:  
**Unidad de Investigación**

San José, Costa Rica  
Octubre, 2011

Información técnica del documento

<b>1. Informe</b> LM-PI-UI-007-11		<b>2. Copia No.</b> 1
<b>3. Título y subtítulo:</b> EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE BASES ESTABILIZADAS CON ASFALTOS ESPUMADOS EN TRAMOS DE PRUEBA		<b>4. Fecha del Informe</b> Octubre, 2011
<b>7. Organización y dirección</b> Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440		
<b>8. Notas complementarias</b> <i>El Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica como parte de su actividad ordinaria realiza actividades de investigación. De igual forma la ley 8114 artículo 6 inciso i le otorga a esta institución la potestad de ejecutar proyectos de investigación sobre los problemas de la infraestructura vial pavimentada del país. De esta forma, el proyecto de investigación "Evaluación del desempeño de bases estabilizadas con asfaltos espumados en tramos de prueba" que se realizará sobre la Ruta Nacional No.224 (Tramo: Entrada de Ujarrás – Represa de Cachi) corresponde a labores netamente de investigación y no debe considerarse como un proceso de auditoría, ni de control de calidad, siendo esta última tarea un aspecto que le compete exclusivamente a la Administración.</i>		
<b>9. Resumen</b> <i>Los asfaltos espumados son una técnica que se ha utilizado con éxito en distintos países en la producción de mezclas asfálticas tibias. Por su parte el número de kilómetros de pistas deterioradas que son rehabilitados anualmente a través del reciclado con asfalto espumado se incrementa año a año y es usado en aplicaciones a caminos de bajo volumen de tránsito, así como en carreteras de varios carriles sujetas a tráfico pesado. En general se tiene que los materiales estabilizados con asfalto espumado permiten: 1) aumentar la resistencia a cortante y reducir la susceptibilidad al daño por humedad de los materiales granulares estabilizados, 2) incremento en la rigidez de la capa de base volviéndola flexible y resistente a la fatiga; 3) además puede ser utilizado como un agente estabilizador de varios materiales, con la ventaja de que el material tratado con asfalto espumado puede ser colocado, compactado y abierto al tráfico inmediatamente. Con el siguiente proyecto se busca verificar y monitorear dichas mejoras en el desempeño en campo de estos materiales en el tramo que estará ubicado sobre la Ruta Nacional No.224 (Tramo: Entrada de Ujarrás – Represa de Cachi). Como parte del proyecto se pretende evaluar si existe un aumento en la vida útil de la carretera (reducción en frecuencia de actividades de mantenimiento). De ser así, esta tecnología podrá evaluarse como una alternativa competitiva, económica o ambientalmente amistosa al mediano o largo plazo dependiendo de su del desempeño funcional y durabilidad ante condiciones climáticas lluviosas o de alta humedad. De esta manera, se evaluará si la implementación de dicha tecnología podría adecuarse a otras condiciones y rutas nacionales.</i>		
<b>10. Palabras clave</b> ESTABILIZACIÓN, ASFALTO ESPUMADO, BASES	<b>11. Nivel de seguridad:</b> Ninguno	<b>12. Núm. de páginas</b> 51
<b>13. Preparado por:</b>		
Ing. Gustavo A. Badilla Vargas Investigador 	Ing. Tania Ávila Esquivel Investigadora 	Adriana Duarte Pedroza Asistente 
Fecha: 11 / 10 / 2011	Fecha: 11 / 10 / 2011	Fecha: 11 / 10 / 2011
<b>14. Revisado por:</b>		<b>15. Aprobado por:</b>
Ing. José Pablo Aguiar, PhD Coordinador Unidad de Investigación 	Ing. Fabián Elizondo Arrieta Sub-Coordinador PITRA 	Ing. Guillermo Loria Salazar, PhD Coordinador General PITRA 
Fecha: 11 / 10 / 2011	Fecha: 11 / 10 / 2011	Fecha: 11 / 10 / 2011



## TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	V
ÍNDICE DE TABLAS.....	V
RESUMEN EJECUTIVO.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	2
1.1 OBJETIVO GENERAL .....	3
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
1.3 ANTECEDENTES .....	3
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	4
<i>VENTAJAS DE LOS ASFALTOS ESPUMADOS:</i> .....	5
1.5 MARCO TEÓRICO.....	6
<i>DEFINICIÓN</i> .....	6
<i>PROPIEDADES Y ESPECIFICACIONES</i> .....	7
<i>DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN LABORATORIO</i> .....	10
<i>Caracterización del agregado:</i> .....	10
<i>Determinación del contenido de humedad óptimo de la mezcla:</i> .....	10
<i>Determinación del contenido óptimo de asfalto:</i> .....	10
<i>Caracterización del desempeño de la mezcla asfáltica óptima:</i> .....	11
<i>Factores que influyen a las propiedades de la espuma:</i> .....	11
<i>Características aceptables de espumado:</i> .....	13
<i>Dispersión del asfalto espumado:</i> .....	14
<i>Material adecuado para tratamiento con asfalto espumado:</i> .....	15
<i>Muestras de material utilizadas para el diseño de mezclas:</i> .....	17
<i>TRABAJANDO CON ASFALTO ESPUMADO</i> .....	18
<i>Seguridad</i> .....	18
<i>Temperatura de material</i> .....	18
<i>Consistencia del suministro de asfalto</i> .....	19
<i>Flujo de asfalto</i> .....	20
<i>Presión de asfalto</i> .....	20
<i>Aplicación de un filler activo</i> .....	20
<i>Remezclado de la capa finalizada</i> .....	21
<i>PROPIEDADES TÍPICAS DE MATERIALES ESTABILIZADOS CON ASFALTO ESPUMADO</i> .....	21
<i>Resistencia</i> .....	23



<i>Rigidez</i> .....	24
2. METODOLOGÍA PROPUESTA.....	25
2.1 INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA RELACIONADA CON ASFALTO ESPUMADO.....	25
2.2 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN EXISTENTE RELACIONADA CON EL TRAMO DE APLICACIÓN DE ASFALTO ESPUMADO .....	26
2.3 EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES DEL TRAMO DE PRUEBA, PREVIO A LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA. ....	26
2.4 EVALUACIÓN EN LABORATORIO DE LOS MATERIALES EN LOS CUALES SE HA APLICADO LA METODOLOGÍA DE ESTABILIZACIÓN CON ASFALTO ESPUMADO. ....	27
2.5 EVALUACIÓN EN CAMPO DE LA CONDICIÓN INICIAL DEL TRAMO DESPUÉS DE LA APLICACIÓN DEL ASFALTO ESPUMADO.....	28
2.6 MONITOREO DEL DESEMPEÑO EN CAMPO EN EL CORTO PLAZO DE TRAMOS ESTABILIZADOS CON ASFALTO ESPUMADO.....	29
2.7. ANÁLISIS DE RESULTADOS, HALLAZGOS Y OBSERVACIONES .....	29
2.8 ELABORACIÓN DE INFORMES, PUBLICACIONES, MANUALES Y PRODUCTOS .....	29
3. RESULTADOS / PRODUCTOS ESPERADOS.....	30
4. CONFORMACIÓN DEL GRUPO DE INVESTIGACIÓN .....	31
5. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES .....	32
6. RECURSOS NECESARIOS.....	33
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	35
ANEXO A. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE PARA MATERIALES ESTABILIZADOS CON ASFALTO ESPUMADO (WIRTGEN, 2004). ....	36
<i>PREPARACIÓN DE MATERIALES ESTABILIZADOS CON ASFALTO ESPUMADO:</i> .....	36
<i>Determinación de las Propiedades de Espumación del Asfalto</i> .....	36
<i>Preparación de Muestras para Tratamientos con Asfalto Espumado</i> .....	38
<i>Fabricación de especímenes de 100 mm de diámetro</i> .....	40
<i>Determinación del Contenido Óptimo de Asfalto para Materiales Estabilizados con Asfalto</i> .....	42
<i>Procedimientos de Ensayo de Resistencia</i> .....	44



## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. COMBINACIÓN DEL ASFALTO Y EL AGUA .....	7
FIGURA 2. RELACIÓN DE LA VIDA MEDIA VRS LA RAZÓN DE EXPANSIÓN .....	9
FIGURA 3. RELACIÓN ENTRE PROPIEDADES DEL ASFALTO ESPUMADO .....	12
FIGURA 4. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES ADECUADOS PARA TRATAMIENTO CON ASFALTO ESPUMADO.....	16
FIGURA 5. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE AGUA PARA LA ESPUMACIÓN .....	37

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. FACILIDAD DEL ASFALTO ESPUMADO PARA DISPERSARSE (CAPACIDAD DE MEZCLADO) .....	19
TABLA 2. CONTENIDO DE ASFALTO ESPUMADO TÍPICO RELATIVO A GRANULOMETRÍA DEL AGREGADO.....	22
TABLA 3. RESISTENCIA A LA TRACCIÓN INDIRECTA DE MATERIALES ESTABILIZADOS CON ASFALTO ESPUMADO.....	23
TABLA 4. RANGOS DE MÓDULOS RESILIENTES TÍPICOS PARA MATERIAL ESTABILIZADO, ENSAYADOS EN LABORATORIO .....	24
TABLA 5. RESPONSABLES DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN .....	31
TABLA 6. ADMINISTRACIÓN, TRANSPORTE DE MATERIALES Y PONENCIAS (US\$) .....	33
TABLA 7. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS DE CAMPO/LABORATORIO A REALIZAR .....	34



## RESUMEN EJECUTIVO

Los asfaltos espumados son una técnica que se ha utilizado con éxito en distintos países en la producción de mezclas asfálticas tibias. Por su parte el número de kilómetros de pistas deterioradas que son rehabilitados anualmente a través del reciclado con asfalto espumado se incrementa año a año y es usado en aplicaciones a caminos de bajo volumen de tránsito, así como en carreteras de varios carriles sujetas a tráfico pesado. En general se tiene que los materiales estabilizados con asfalto espumado permiten: 1) aumentar la resistencia a cortante y reducir la susceptibilidad al daño por humedad de los materiales granulares estabilizados, 2) incremento en la rigidez de la capa de base volviéndola flexible y resistente a la fatiga; 3) además puede ser utilizado como un agente estabilizador de varios materiales, con la ventaja de que el material tratado con asfalto espumado puede ser colocado, compactado y abierto al tráfico inmediatamente. Con el siguiente proyecto se busca verificar y monitorear dichas mejoras en el desempeño en campo de estos materiales en el tramo que estará ubicado sobre la Ruta Nacional No.224 (Tramo: Entrada de Ujarrás – Represa de Cachí). Como parte del proyecto se pretende evaluar si existe un aumento en la vida útil de la carretera (reducción en frecuencia de actividades de mantenimiento).

De ser así, esta tecnología podrá evaluarse como una alternativa competitiva, económica o ambientalmente amistosa al mediano o largo plazo dependiendo de su del desempeño funcional y durabilidad ante condiciones climáticas lluviosas o de alta humedad. De esta manera, se evaluará si la implementación de dicha tecnología podría adecuarse a otras condiciones y rutas nacionales.

Para lograr con dicho objetivo, se han definido 8 etapas que incluyen: la investigación bibliográfica de la metodología a evaluar, la recopilación de la información existente del proyecto, la evaluación de las condiciones antes y después de implementar la metodología de estabilización en el tramo de prueba, así como también una serie de ensayos en laboratorio para determinar las características físico-mecánicas del material estabilizado.



## 1. INTRODUCCIÓN

El Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica como parte de su actividad ordinaria realiza actividades de investigación. De igual forma la ley 8114 artículo 6 inciso i le otorga a esta institución la potestad de ejecutar proyectos de investigación sobre los problemas de la infraestructura vial pavimentada del país. De esta forma, el proyecto de investigación “Evaluación del desempeño de bases estabilizadas con asfaltos espumados en tramos de prueba” que se realizará sobre la Ruta Nacional No.224 (Tramo: Entrada de Ujarrás – Represa de Cachí) corresponde a labores netamente de investigación y no debe considerarse como un proceso de auditoría, ni de control de calidad, siendo este última tarea un aspecto que le compete exclusivamente a la Administración.

El asfalto espumado o ligante expandido es producido mediante un proceso mecánico en el cual se inyecta, con ayuda de aire presurizado, una cantidad pequeña de agua al asfalto caliente dentro de una cámara de expansión, lo que resulta en la producción instantánea de espuma en el asfalto. El efecto de espuma se produce en el momento que las pequeñas gotas de agua fría entran en contacto con el asfalto caliente, lo que ocasiona transferencia de energía entre el asfalto y el agua. Esto produce un aumento en la temperatura del agua a más de 100°C, la cual se evapora instantáneamente creando burbujas de vapor cubierta por una película delgada de asfalto.

Con base en las distintas investigaciones que se han realizado acerca del uso de mezclas asfálticas tibias producidas con asfalto espumado se han identificado varias ventajas que actualmente se asocian a esta tecnología. Entre las ventajas más sobresalientes se mencionan: que el asfalto espumado puede ser utilizado como un agente estabilizador para gran variedad de materiales, aumenta la resistencia a cortante y reduce la susceptibilidad al daño por humedad de los materiales granulares estabilizados, reducción de costos de transporte, el material tratado con asfalto espumado puede ser colocado, compactado y abierto al tráfico inmediatamente, el material tratado con asfalto espumado se mantiene trabajable por extensos períodos de tiempo y puede ser colocado en condiciones climáticas adversas, entre otras ventajas.

Como desventajas se mencionan: presenta una apariencia engañosa, pues tiene un aspecto café más que negro y brillante, con el tiempo es que se pone de color negro. Por su

Informe LM-PI-UI-007-11	Fecha de emisión: 11 de octubre 2011	Página 2 de 51
-------------------------	--------------------------------------	----------------



simplicidad puede ocasionar que los controles de calidad sean menospreciados, pero como todo proceso de pavimentación se requiere de la atención y cuidado de todo el proceso.

### **1.1 Objetivo general**

Valorar el efecto del asfalto espumado como aditivo estabilizador de las propiedades mecánicas, así como la durabilidad de dicho material estabilizado, en un tramo de prueba que se construirá sobre la Ruta Nacional No.224 (Tramo: Entrada de Ujarrás – Represa de Cachí)

### **1.2 Objetivos específicos**

Investigar la normativa vigente referente al asfalto espumado como aditivo estabilizador de bases granulares y pavimentos asfálticos reciclados (RAP).

Auscultación de las condiciones actuales de un tramo de prueba previo a la aplicación de la metodología de asfalto espumado.

Evaluar las variaciones en laboratorio del comportamiento y propiedades físico-mecánicas de materiales estabilizados con asfalto espumado.

Documentar y evaluar la construcción, comportamiento y desempeño en campo de tramos de prueba.

Monitorear el desempeño a mediano plazo de tramos de pavimento estabilizados con asfalto espumado.

### **1.3 Antecedentes**

Los asfaltos espumados son una técnica que se ha utilizado con éxito en distintos países en la producción de mezclas asfálticas tibias. En lo concerniente a Costa Rica, ya se han adquirido equipos que permitan el uso de tal tecnología, por lo que se considera fundamental evaluarla previo a su uso difundido en el país.

La primera persona en darse cuenta del potencial de usar asfalto espumado como agente estabilizador fue el profesor Ladis Csanyi en la Estación Experimental de Ingeniería (Engineering Experiment Station) de la Universidad Estatal de Iowa (Iowa State University)

Informe LM-PI-UI-007-11	Fecha de emisión: 11 de octubre 2011	Página 3 de 51
-------------------------	--------------------------------------	----------------



en 1956. Esta tecnología fue refinada más tarde por la organización Mobil Oil que desarrolló la primera cámara de expansión para mezclar agua con asfalto con el propósito de producir espuma.

#### 1.4 Justificación

A pesar de que la aplicación del asfalto espumado se descubrió en los años '50, han sido pocos los proyectos que se han construido utilizando esta tecnología. Las pruebas principales corresponden a tramos cortos y generalmente ha sido poco el monitoreo del desempeño de dichas secciones.

Inicialmente, los procedimientos de diseño de mezcla y la caracterización de los materiales se basan en especímenes de 100 mm de diámetro fabricados con un martillo Marshall estándar, de manera similar al método de compactación y evaluación de mezclas asfálticas en caliente. A medida que se hizo evidente el hecho de que el material tratado con asfalto espumado se comportaba de forma distinta a la mezcla asfáltica en caliente, los ensayos de la estabilidad y el flujo Marshall fueron gradualmente reemplazados por ensayos de tracción indirecta, procedimientos que, como se detalla más adelante, son utilizados hasta el día de hoy.

El interés en la tecnología aumentó a partir del año 1996 cuando se desarrollaron e incorporaron cientos de sistemas a distintos modelos de recicladoras, tanto en planta como en sitio. El número de kilómetros de pistas deterioradas que son rehabilitados anualmente a través del reciclado con asfalto espumado se incrementa año a año y es usado en aplicaciones a caminos de bajo volumen de tránsito, así como en carreteras de varios carriles sujetas a tráfico pesado. Sin embargo, la investigación concerniente al desempeño de dichas carreteras ha sido limitada.

En el 2000, en Sudáfrica se realizaron una serie de ensayos con el Simulador de Vehículos Pesados (HVS, por sus siglas en inglés). Los ensayos fueron realizados en un pavimento reciclado con una combinación de cemento y asfalto espumado. Los resultados se usaron como base en el desarrollo de un documento guía que fue posteriormente publicado por la Asphalt Academy en la segunda mitad del 2002: "TG2: Guía Técnica Provisoria: Diseño y Uso de Materiales Tratados con Asfalto Espumado" (Jenkins, K. et al, 2002). En esta guía

Informe LM-PI-UI-007-11	Fecha de emisión: 11 de octubre 2011	Página 4 de 51
-------------------------	--------------------------------------	----------------



se incluyeron recomendaciones de diseño basadas en funciones de transferencia (fatiga) para estimar la capacidad estructural de los pavimentos construidos usando material reciclado estabilizado con asfalto espumado. Sin embargo, el documento es “provisorio” ya que fue basado en investigación muy limitada. Actualmente, más ensayos usando el HVS y otros estudios se están realizando y se espera que muy pronto se publique una actualización a la guía TG2.

*Ventajas de los asfaltos espumados:*

Con base en las distintas investigaciones que se han realizado acerca del uso de mezclas asfálticas tibias producidas con asfalto espumado se han identificado varias ventajas que actualmente se asocian a esta tecnología. Entre las ventajas más sobresalientes se mencionan los siguientes:

El asfalto espumado puede ser utilizado como un agente estabilizador para gran variedad de materiales que van desde piedra triturada de buena calidad hasta gravas marginales con cierto grado de plasticidad.

Aumenta la resistencia a cortante y reduce la susceptibilidad al daño por humedad de los materiales granulares estabilizados. Además provee mayor rigidez a la capa de base volviéndola flexible y resistente a la fatiga.

Reducción de los costos de ligante asfáltico, ya que el asfalto espumado normalmente se usa con un asfalto de penetración estándar y un pequeño porcentaje de agua (típicamente un 2% en masa del asfalto).

Con la tecnología de asfalto espumado no se incurren en costos de fabricación adicionales al costo de inversión inicial del equipo.

Reducción de costos de transporte: para una misma proporción de asfalto residual una emulsión contiene 40% de agua la cual debe ser transportada con el asfalto.

El material tratado con asfalto espumado puede ser colocado, compactado y abierto al tráfico inmediatamente.

El material tratado con asfalto espumado se mantiene trabajable por extensos períodos de tiempo y puede ser colocado en condiciones climáticas adversas sin que el asfalto se separe del agregado. Esta trabajabilidad de la mezcla facilita la conformación, compactación y acabado de la capa de ruedo.



Conservación de energía: solo se necesita calentar el asfalto antes de ser espumado; los agregados se pueden mezclar en frío y húmedos (no requieren de secado).

Amigable con el ambiente: no se presenta evaporación de volátiles en todo el proceso desde el mezclado hasta el curado.

El proceso de asfalto espumado puede ser usado para tratar materiales in-situ con contenidos de humedad de terreno relativamente altos, debido a que el ligante asfáltico puede ser agregado sin usar agua adicional.

De forma similar a la estabilización con emulsión asfáltica, se pueden agregar pequeñas proporciones de cemento o cal junto con el asfalto espumado. El objetivo es mejorar la resistencia retenida en condiciones de humedad. El empleo de un filler activo también 1) ayuda en la dispersión del asfalto al incrementar la fracción menor a 0,075 mm del material, 2) mejora la trabajabilidad de la mezcla y 3) reduce el Índice de Plasticidad.

## 1.5 Marco teórico

### *Definición*

El asfalto espumado o ligante expandido es producido mediante un proceso mecánico en el cual se inyecta, con ayuda de aire presurizado, una cantidad pequeña de agua (entre 1 % y 2 % sobre el peso del ligante) al asfalto caliente (160 °C a 180°C) dentro de una cámara de expansión, lo que resulta en la producción instantánea de espuma en el asfalto.

El efecto de espuma se produce en el momento que las pequeñas gotas de agua fría entran en contacto con el asfalto caliente, lo que ocasiona transferencia de energía entre el asfalto y el agua. Esto produce un aumento en la temperatura del agua a más de 100°C, la cual se evapora instantáneamente creando burbujas de vapor que se encapsulan dentro del asfalto. Tan pronto como el agua alcanza su punto de ebullición, cambia de estado, y al hacerlo, crea una burbuja cubierta por una película delgada de asfalto llena con vapor de agua.

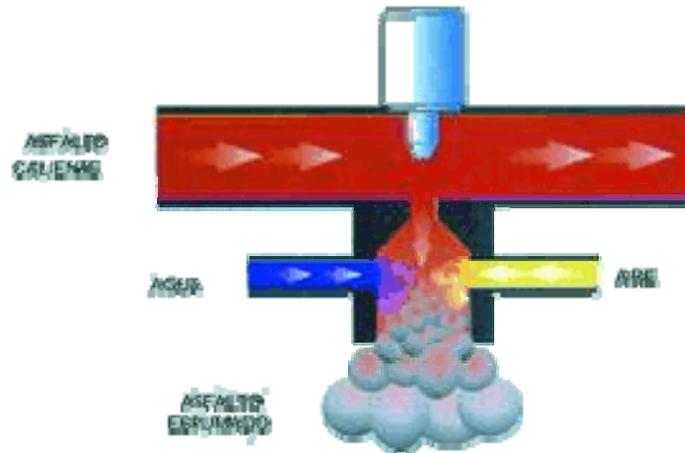


FIGURA 1. COMBINACIÓN DEL ASFALTO Y EL AGUA

*Fuente: Wirtgen, 2004*

Esta mezcla se libera a través de una boquilla y el vapor encapsulado se expande formando burbujas de asfalto que aumentan en volumen (de 10 a 12 veces) hasta alcanzar el equilibrio por tensión superficial. Este proceso reduce la viscosidad del asfalto lo que permite el mezclado con los agregados humedecidos a temperatura ambiente. Sin embargo, el equilibrio dura menos de 1 minuto debido a la baja conductividad térmica del asfalto y del agua. Una vez que el asfalto espumado llega a temperatura ambiente las burbujas de vapor colapsan por condensación y se desintegra la espuma. El asfalto recupera su volumen inicial (Thenoux y Jamet, 2002).

En el estado espumado (un estado temporal de baja viscosidad), el asfalto puede ser agregado y mezclado con los agregados a temperatura ambiente y con humedad in-situ. El proceso de asfalto espumado es análogo al de un panadero batiendo la clara del huevo para formar espuma de baja viscosidad, antes de mezclarla con la harina. En el proceso de batido, la clara del huevo se transforma en burbujas de película delgadas llenas con aire, ocupando así un volumen mucho mayor. Esto permite la distribución homogénea de las partículas finas de harina, logrando alcanzar una mezcla consistente. El proceso de espumado del asfalto es dependiente del cambio de estado del agua de líquido a vapor, un proceso que va acompañado de una expansión en volumen de hasta 1500 veces el volumen original del líquido (entre el agua en estado líquido y la presión atmosférica normal).

### *Propiedades y especificaciones*

Informe LM-PI-UI-007-11	Fecha de emisión: 11 de octubre 2011	Página 7 de 51
-------------------------	--------------------------------------	----------------

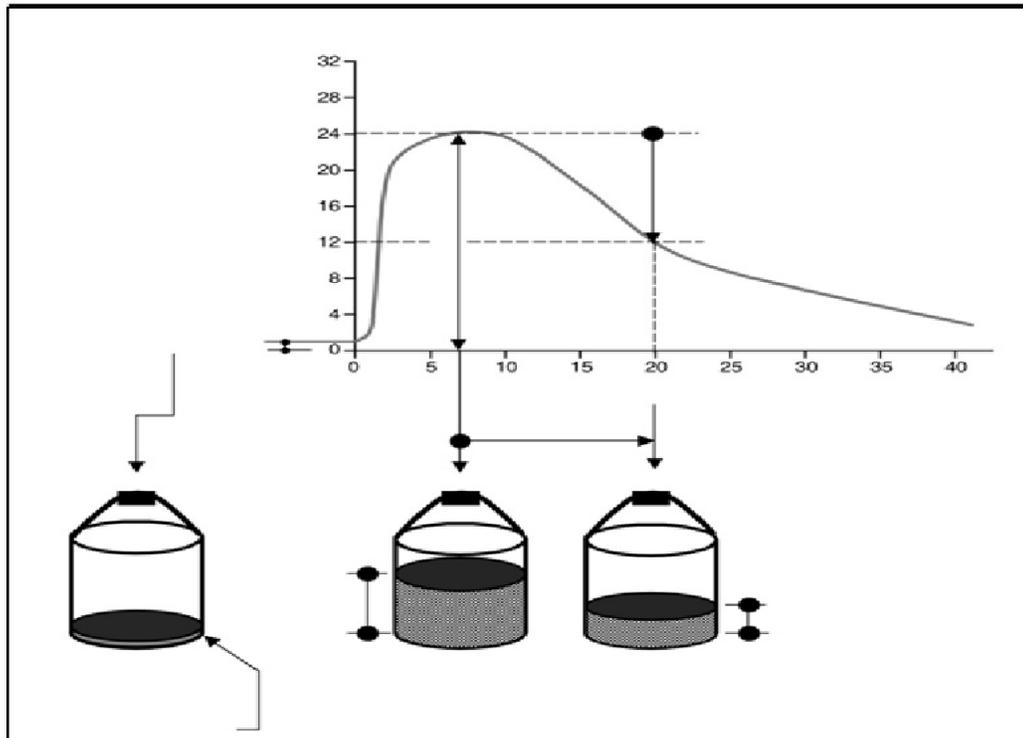


El asfalto espumado es caracterizado principalmente, por medio de dos propiedades:

Razón de expansión (ER): es la medida de viscosidad de la espuma y determina que tan bien está dispersa la mezcla. Indica la trabajabilidad del asfalto y su capacidad de recubrir los agregados. Se calcula como la razón entre el volumen máximo de asfalto espumado y el volumen original de asfalto.

Vida media ( $T_{1/2}$ ): es la medida de la estabilidad del asfalto espumado e indica la tasa de colapso de la espuma. Se calcula como el tiempo en segundos que dura el asfalto espumado en colapsar a la mitad de su volumen máximo.

Las dos propiedades previas se ven afectadas por (en orden de influencia): 1) la temperatura del asfalto - a mayor temperatura mayor cantidad de espuma es obtenida. Es recomendable utilizar temperaturas mayores a 149 °C (Abel, 1978). 2) La cantidad de agua adicionada - al aumentar la cantidad de agua incrementa el volumen de espuma hasta 1500 veces (Wirtgen, 2004). Sin embargo, la vida media se reduce, por lo que estas dos características están inversamente relacionadas a la cantidad de agua añadida. 3) El uso de aditivos (ej. compuestos de silicona) hacen perder la capacidad de espumación del asfalto. 4) La presión del asfalto y agua - mayores presiones permiten una mejor “atomización” de las partículas, lo que mejora la uniformidad de la espuma. 5) La viscosidad del asfalto - no es clara la influencia de esta propiedad sobre la tasa de expansión y la vida media.



**FIGURA 2.** RELACIÓN DE LA VIDA MEDIA VRS LA RAZÓN DE EXPANSIÓN  
*Fuente: Wirtgen, 2004*

Las especificaciones mínimas aceptables (Wirtgen, 2004) para una estabilidad efectiva del espumado son:  $ER = 8$  y  $T_{1/2} = 6$  segundos. Si estas no se cumplen, se tiene que descartar el asfalto pues no es adecuado para ser espumado.

Puesto que el contenido de agua a añadir es tan importante para la espumación, este debe ser diseñado apropiadamente. En el laboratorio se deben adicionar distintos porcentajes de agua sobre masa de asfalto y graficar la expansión y la vida media para obtener el contenido de agua a utilizar en la planta de producción. Por ejemplo, se pueden usar los siguientes porcentajes: 2%, 3% y 4%, y mostrar ambas características en un mismo gráfico.

En cuanto a la medición de estos parámetros en el laboratorio, los resultados dependen del tamaño del recipiente donde se mida la formación de espuma, por lo que es muy importante, estandarizar el tamaño para obtener resultados reproducibles.



### *Diseño de mezcla asfáltica en laboratorio*

Una vez encontrado el contenido de agua a añadir para la formación óptima de espuma del asfalto, se puede continuar con el diseño de mezcla asfáltica, que incluye las siguientes etapas:

Caracterización del agregado

Determinación del contenido óptimo de humedad de la mezcla

Determinación del contenido óptimo de asfalto

Caracterización del desempeño de la mezcla asfáltica óptima

#### Caracterización del agregado:

El asfalto espumado se puede mezclar con distintos tipos de agregados que van desde arenas hasta gravas quebradas y material de reciclado de pavimentos (RAP). Se debe estudiar la granulometría y el índice de plasticidad de los materiales. Es muy importante hacer notar que materiales con poca cantidad de finos no se mezclan bien con el asfalto espumado, por lo que se especifica un mínimo de 5 % pasando el tamiz de 0,075 mm (Nº 200). Cuando el material es deficiente en la cantidad de finos se recomienda utilizar cemento, cal u otro material fino.

La especificación actual evalúa la granulometría de los materiales para establecer si son adecuados para la mezcla con asfalto espumado.

#### Determinación del contenido de humedad óptimo de la mezcla:

El ensayo Proctor Modificado se realiza para determinar el contenido óptimo de agua a la máxima densidad. El 75% de la densidad máxima de la mezcla es asumido como el contenido de humedad. Esta cantidad de agua es muy importante debido al efecto lubricante que producen sobre las partículas granulares la hora de mezclar con el asfalto espumado.

#### Determinación del contenido óptimo de asfalto:

La temperatura de mezclado del asfalto y los agregados debe estar entre 13 °C y 23 °C para obtener un buen recubrimiento de los agregados, aunque aumentar la temperatura de los agregados ayuda a mejorar este recubrimiento. Típicamente se preparan 6 especímenes Marshall a 75 golpes con distintos contenidos de asfalto entre 1 % y 3 % asegurando un buen recubrimiento de los agregados con el asfalto. También se preparan 2 especímenes para obtener las propiedades volumétricas de la mezcla. Los especímenes compactados se

Informe LM-PI-UI-007-11	Fecha de emisión: 11 de octubre 2011	Página 10 de 51
-------------------------	--------------------------------------	-----------------



someten a un acondicionamiento acelerado en el laboratorio a una temperatura de 60 °C por 3 días en un horno. Luego se determina la resistencia a Tracción Indirecta de especímenes secos y especímenes saturados (sumergidos en agua durante 24 horas a 25 °C). El contenido de asfalto óptimo es el contenido en el que se presenta la resistencia a tracción indirecta máxima de los especímenes saturados.

#### Caracterización del desempeño de la mezcla asfáltica óptima:

Una gran mayoría de las investigaciones y estudios emplean los parámetros CBR, Compresión Inconfinada, Tracción Indirecta (Susceptibilidad al daño por humedad), Módulo Resiliente y Resistencia a la Fatiga (Thenoux y Jamet, 2002). También es muy importante medir la resistencia a la deformación permanente de estas mezclas.

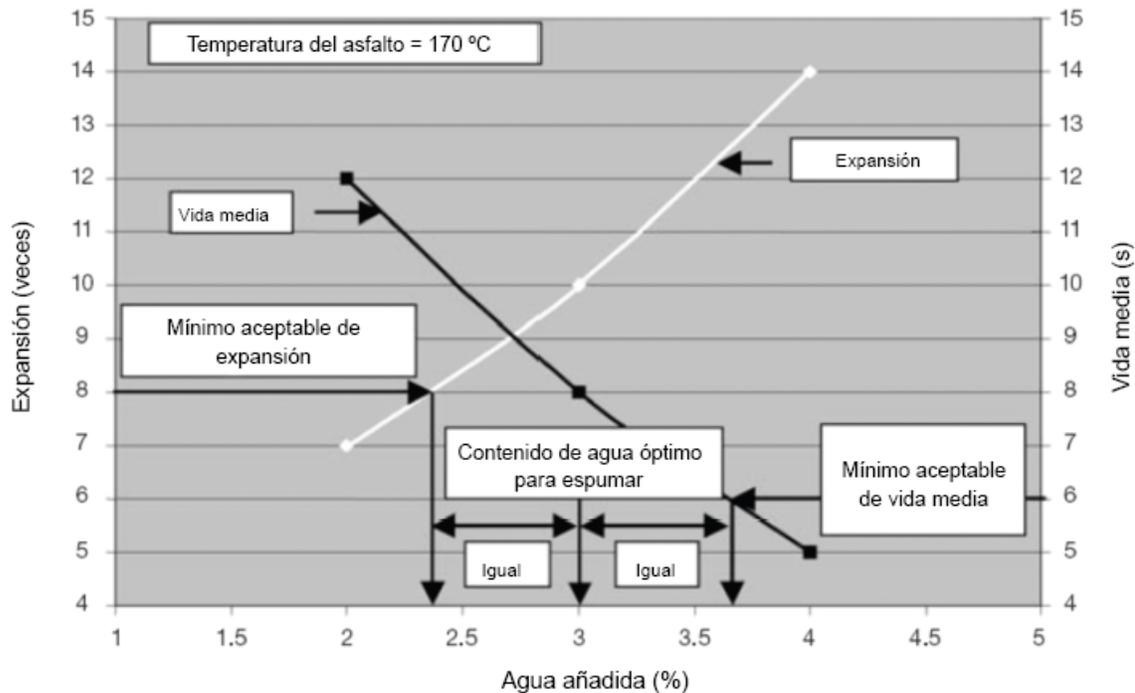
#### Factores que influyen a las propiedades de la espuma:

Se considera que la “mejor” espuma es la que optimiza tanto la tasa de expansión como la vida media. La determinación de las propiedades espumantes de un asfalto se obtiene usando los procedimientos descritos para el diseño de mezclas de material tratado con asfalto espumado.

La tasa de expansión y la vida-media del asfalto espumado está afectado por:

##### Adición de agua:

Como se mencionó anteriormente aumentar la cantidad de agua aumenta el tamaño de las burbujas creadas. Esto genera un aumento en la tasa de expansión. Sin embargo, el aumentar el tamaño individual de las burbujas reduce el espesor de la película del asfalto que las rodea, haciéndolas menos estables y resultando en una reducción de la vida media.



**FIGURA 3.** RELACIÓN ENTRE PROPIEDADES DEL ASFALTO ESPUMADO  
*Fuente: Wirtgen, 2004*

#### Tipo de asfalto:

Generalmente se utilizan asfaltos con valores de penetración entre 80 y 150 para espumar, pese a que asfaltos más rígidos que cumplen con los requisitos mínimos de espumado (explicado más adelante) también han sido utilizados en el pasado. Por razones prácticas, los asfaltos más rígidos son generalmente evitados ya que producen una espuma de peor calidad, lo que resulta en una dispersión más pobre.

#### Fuente de Asfalto:

Algunos asfaltos espuman mejor que otros debido a su composición. Por ejemplo, las propiedades espumantes de los asfaltos en Venezuela exceden enormemente a aquellos de otras fuentes.

#### Temperatura de Asfalto:

La viscosidad del asfalto goza de una relación inversa con la temperatura; a medida que la temperatura aumenta, la viscosidad se reduce.



De tal forma, mientras más baja sea la viscosidad, mayor es el tamaño de la burbuja que se formará cuando el agua cambie de estado en el proceso de espumado. Debido a que este proceso utiliza energía del asfalto, la temperatura antes del espumar debe exceder los 160 °C para obtener un producto satisfactorio.

#### Presión de asfalto y de agua:

El asfalto y el agua son inyectados en la cámara de expansión a través de pequeñas aberturas. El aumentar la presión en las tuberías de suministro causa que el flujo que pasa a través de estas aberturas se disperse (atomice). Mientras más pequeñas son las partículas individuales, mayor es el área de contacto disponible, mejorando así la uniformidad de la espuma.

#### Aditivos:

Existen muchos productos en el mercado que van a afectar las propiedades espumantes del asfalto, tanto negativa (agentes anti-espumantes) como positivamente (espumantes). Usualmente, los espumantes son sólo requeridos cuando el asfalto ha sido tratado con un agente anti-espumante (normalmente durante el proceso de refinado). La mayoría de los espumantes son añadidos al asfalto antes de calentar a las temperaturas de aplicación y tienden a ser sensibles a la temperatura, siendo su vida útil bastante corta. Para garantizar los beneficios del uso de un agente espumante, el asfalto debe ser utilizado dentro de pocas horas de ser tratado. Sin embargo, estos productos son generalmente caros y se consideran sólo como un último recurso para mejorar las propiedades de un asfalto difícil de espumar (diluir el asfalto con petróleo diesel ha demostrado ser exitoso en reducir la viscosidad suficientemente como para alcanzar una espuma aceptable. Sin embargo, esto no se recomienda a menos que sea realizado directamente por un proveedor de asfalto)

#### Características aceptables de espumado:

Utilizando los procedimientos que se describen posteriormente, todos los asfaltos que se pretenden usar para espumar deben ser evaluados en el laboratorio para determinar sus propiedades espumantes. El objetivo de este ejercicio es encontrar la combinación de temperatura de asfalto y adición de agua a la que se consigue un espumado óptimo (la mayor tasa de expansión y vida media). Como se mencionó anteriormente, cada asfalto es distinto e incluso diferentes lotes de asfalto de una misma fuente van a variar. Sin embargo,

Informe LM-PI-UI-007-11	Fecha de emisión: 11 de octubre 2011	Página 13 de 51
-------------------------	--------------------------------------	-----------------



siguiendo un simple procedimiento de laboratorio se puede determinar el porcentaje de agua y la temperatura, para cada tipo de asfalto que se desee espumar. Los parámetros determinados en laboratorio serán utilizados en terreno a escala real. No hay límites superiores para las propiedades del espumado y el objetivo siempre es el de producir la mejor calidad de espuma requerida para la estabilización. Solamente se encuentran problemas cuando un asfalto no produce una “buena” espuma. Esto ha conllevado al establecimiento de límites inferiores. Los valores mínimos aceptados de tasa de expansión y vida media para estabilizar un material a 25 °C son: ER = 10 y  $T_{1/2} = 8$  segundos.

La experiencia ha demostrado que la dispersión adecuada de la espuma y la estabilización efectiva son posibles cuando las tasas de expansión son tan bajas como 8 y la vida media de sólo 6 segundos. Sin embargo, el resultado del proceso de espumación también es función de otros parámetros como lo son la temperatura de los materiales. Durante su investigación con asfaltos espumados a finales de los '90, el profesor Kim Jenkins desarrolló el concepto de “Índice de Espumación” para medir la combinación de tasa de expansión y vida media. Definió el Índice de Espumación como el área bajo la curva obtenida de graficar la tasa de expansión v/s la vida media, concluyendo que a mejores propiedades de espumado, mejor el Índice de Espumación y mejor el producto estabilizado alcanzado. Como parte de la investigación, se comparó el efecto del Índice de Espumación con la temperatura del material al tiempo de mezclado. Con base a esto se concluyó que a medida que la temperatura aumenta, un menor Índice de Espumación puede ser usado para alcanzar una estabilización efectiva.

#### Dispersión del asfalto espumado:

A diferencia de las mezclas asfálticas en caliente, el material estabilizado con asfalto espumado no es negro a la vista. Esto se debe a que las partículas más gruesas del agregado no se cubren con asfalto. Cuando el asfalto espumado entra en contacto con el agregado, las burbujas de asfalto revientan en millones de pequeñas gotitas de asfalto que se adhieren a las partículas finas, específicamente la fracción menor a 0,075 mm. Las gotitas de asfalto pueden intercambiar calor sólo con la fracción de filler y todavía tener viscosidad suficientemente baja como para cubrir las partículas. La mezcla espumada resulta en un filler ligado con asfalto que actúa como mortero entre las partículas gruesas, Por ende, hay un ligero oscurecimiento del color del material después del tratamiento. La adición de cemento,

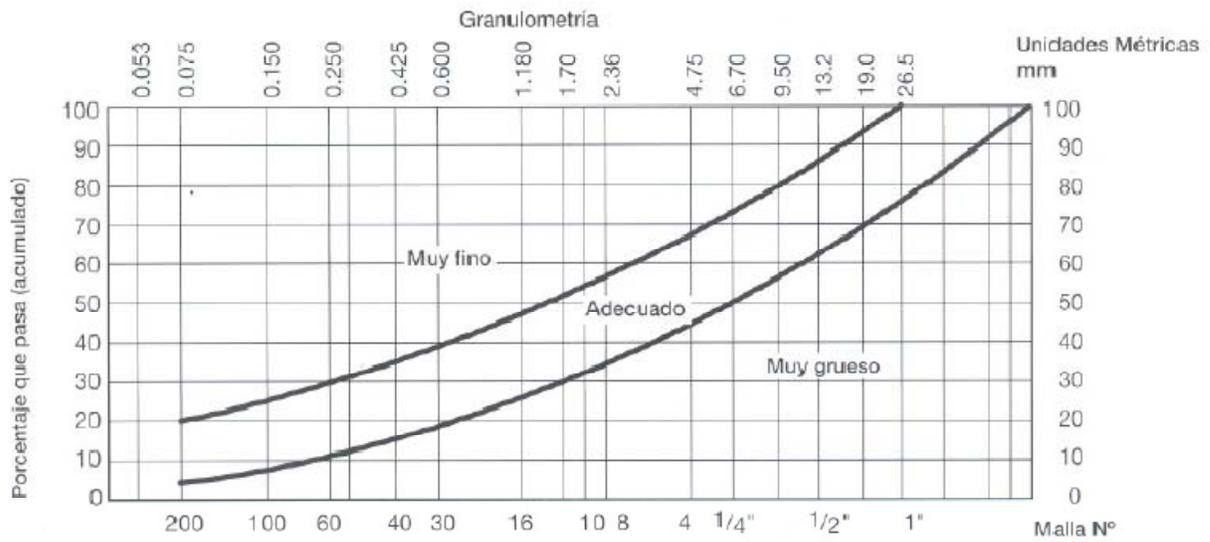


cal o algún material fino similar (100% que pasa el tamiz de 0,075 mm) ayuda a dispersar el asfalto, particularmente donde el material reciclado es deficiente en finos (por ejemplo, menos del 5% pasando el tamiz 0,075 mm). Estudios previos han demostrado que fillers activos (y en particular cemento) no solamente reemplazan al filler natural, sino que además proveen irregularidades en la superficie de las partículas debido a la acción puzolánica. Esto permite una mejor adherencia del asfalto.

Material adecuado para tratamiento con asfalto espumado:

Como se mencionó anteriormente, el rango de materiales que pueden ser estabilizados mediante el proceso de espumación es amplio, permitiendo estabilizar desde arenas y gravas, hasta piedra chancada y RAP. Tanto materiales granulares clasificados como marginales, vírgenes o reciclados, han sido utilizados en forma satisfactoria en el proceso de reciclado. Sin embargo, es importante establecer los límites de tolerancia requerido por los agregados. Esto con el fin de identificar la composición óptima del material que va a ser sometido al tratamiento con asfalto espumado.

Los materiales con bajo contenido de finos no se mezclan en forma adecuada con el asfalto espumado. El porcentaje mínimo de finos requerido es del 5%, considerando como finos la fracción del material que pasa la malla de 0,075 mm (N°200). Cuando un material no tiene la cantidad adecuada de finos, el asfalto espumado no se dispersa en forma apropiada y tiende a formar lo que se conoce en el material reciclado como “filamentos” de asfalto (aglomeraciones de material fino con asfalto), los que varían en tamaño dependiendo de la escasez de finos. Un porcentaje de finos muy bajo resulta en filamentos largos. Estos filamentos actúan como lubricante y producen una disminución en la resistencia y estabilidad del material.



**FIGURA 4. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES ADECUADOS PARA TRATAMIENTO CON ASFALTO ESPUMADO**  
Fuente: Wirtgen, 2004

Ensayos granulométricos simples, que se realizan a partir de muestras extraídas del pavimento existente revelan si puede existir una eventual deficiencia en el contenido de finos. Sin embargo, esta deficiencia puede ser corregida mediante la importación de material adecuado, con un alto contenido de finos. Este material se esparce sobre la superficie del pavimento en forma previa a la aplicación del reciclado. No obstante, los materiales cohesivos deben ser tratados con cuidado. Si bien los ensayos de laboratorio de estos materiales pueden arrojar un alto porcentaje de finos que pasan la malla de 0,075 mm de diámetro, generalmente la calidad del mezclado conseguida en terreno es deficiente. Este fenómeno se debe a la naturaleza plástica del material, la que produce que la fracción fina se aglomere, haciendo difícil la dispersión del asfalto en forma de espuma a través del agregado. Comparaciones entre ensayos granulométricos con agregados lavados y no lavados realizados en laboratorio, sirven como indicación de la existencia del problema. La granulometría del material sin lavar indica la calidad de los finos disponibles. El material que es deficiente en finos puede ser mejorado mediante la adición de cemento, cal u otro material que pase en un 100% la malla No 200. Sin embargo, debe evitarse una dosificación de cemento superior al 1,5%. Un porcentaje mayor de cemento tiene un efecto negativo, producto de la pérdida de flexibilidad en la capa estabilizada. Las bandas granulométricas presentadas en la figura anterior muestran un amplio rango de tolerancia y pueden ser



ajustadas con el objetivo de obtener una granulometría que proporcione la mínima cantidad de vacíos en el agregado mineral. Si se logra producir mezclas con un bajo contenido de vacíos, se obtiene un material estabilizado con asfalto espumado de excelentes propiedades. Una relación única para conseguir la cantidad mínima de vacíos, que permite la variación en el contenido de filler, se presenta en la **ecuación 1**. Esta ecuación es útil, puesto que entrega flexibilidad respecto al contenido de finos de la mezcla. Un valor de  $n=0,45$  se requiere para obtener el mínimo de vacíos.

$$P = F + \frac{(100-F)(d^n - 0.075^n)}{(D^n - 0.075^n)} \quad (1)$$

Donde:

$d$ = tamaño seleccionado del tamiz (mm)

$P$ = porcentaje en peso del material que pasa el tamiz de tamaño  $d$  (mm)

$D$ = tamaño máximo del agregado (mm)

$F$ = porcentaje del contenido de finos (inertes y activos)

$n$ = variable que depende de las características del agregado

Es importante obtener una granulometría continua en la fracción del agregado menor a 2 mm, debido a la dispersión del asfalto espumado y a la facilidad en la compactación, ya que se reducen los vacíos y por lo tanto la susceptibilidad al ingreso de agua. Por lo tanto, cuando sea necesario, debe considerarse la posibilidad de mezclar dos materiales para mejorar una granulometría deficiente.

#### Muestras de material utilizadas para el diseño de mezclas:

El método utilizado para muestrear el material que va a ser estabilizado con asfalto espumado es muy importante. Un control inadecuado o deficiente en la obtención de la muestra deriva en resultados de laboratorio poco representativos o erróneos. Por lo tanto, debe tenerse conocimiento de tres factores importantes para el muestreo:

Profundidad del reciclado, y las proporciones de cada capa in-situ que serán mezcladas y conformarán la capa compuesta.



Variabilidad longitudinal del material y variación en espesores de capa existentes. Esto significa que deben realizarse suficientes diseños de mezclas como para cuantificar el efecto de dicha variabilidad. En los casos donde la variabilidad es significativa, el material de cada capa deberá ser separado en sus fracciones correspondientes, y luego ser mezclado en las proporciones requeridas. De esta forma, puede obtenerse una mezcla óptima cuya granulometría deberá ser posteriormente analizada bajo las condiciones de variabilidad esperadas en el campo.

Preparación del material del pavimento existente a ser usado en la mezcla. La utilización de una máquina de fresado pequeña para el muestreo del material asfáltico es el procedimiento más adecuado para obtener muestras representativas.

#### *Trabajando con asfalto espumado*

Los siguientes puntos deben garantizarse cuando se trabaja con asfalto espumado:

##### Seguridad

Se requiere de una alta temperatura del asfalto para lograr la reacción del agua y producir una espuma aceptable (típicamente sobre 160 °C). A dichas temperaturas, el asfalto es una sustancia letal, y si no se maneja en forma adecuada podría incluso provocar la muerte de una persona. Esta es una característica conocida por los productores de asfalto, que trabajan comúnmente con el material a altas temperaturas. Sin embargo, el constructor que aplica asfalto espumado y ejecuta un proyecto de reciclado por primera vez, debe tomar todas las medidas de precaución necesarias y asegurarse que sus empleados reciban el entrenamiento o capacitación necesarios. Es posible aplicar las mismas normas de seguridad que se utilizan en mezclas asfálticas en caliente para la construcción con asfalto espumado.

##### Temperatura de material

La temperatura del agregado es uno de los factores más importantes en la dispersión adecuada del asfalto espumado en el material reciclado y, por lo tanto, en la resistencia de la nueva capa de pavimento. Como se mencionó anteriormente, el concepto de Índice de Espumación desarrollado por el Profesor Jenkins representa las propiedades espumantes del asfalto (razón de expansión y vida media). La investigación desarrollada demostró que el Índice de Espumación y la temperatura del agregado (al momento de producirse la mezcla)

Informe LM-PI-UI-007-11	Fecha de emisión: 11 de octubre 2011	Página 18 de 51
-------------------------	--------------------------------------	-----------------

son factores importantes en la dispersión obtenida. Para obtener una buena mezcla a temperaturas más bajas son necesarios Índices de Espumación más altos (y por lo tanto, mayor razón de expansión y vida media). A pesar de que estas investigaciones son relevantes, es importante comparar las condiciones de laboratorio a las que realmente se presentan en terreno. La calidad de la espuma producida en el laboratorio es siempre inferior a la producida por la recicladora. Esto se debe principalmente a que las presiones de trabajo utilizadas en terreno son mayores, y a que la continuidad en la operación del tren reciclador permite trabajar a temperaturas más altas. Por lo tanto, existe una variación entre las mediciones de laboratorio y las de terreno, por lo que es importante verificar las propiedades de espumación en campo. Estas mediciones deberían ser comparadas con la temperatura del agregado (y no sólo la superficie del camino).

**Tabla 1.** Facilidad del asfalto espumado para dispersarse (capacidad de mezclado)

Índice de Espumación	Razón de expansión (implícito)	Temperatura del agregado (°C)		
		<15 °C	15 °C a 25 °C	> 25 °C
< 75	<8	Muy mala	Mala	Moderada
75 a 150	8 a 12	Moderada	Buena	Buena
> 150	> 12	Buena	Muy buena	Muy Buena

*Fuente: Wirtgen, 2004*

El trabajo con asfalto espumado no se debería realizar cuando la temperatura del agregado esté bajo los 10 °C.

#### Consistencia del suministro de asfalto

Cuando se acopla un nuevo camión tanque a la recicladora, se deben realizar dos verificaciones para asegurar que el asfalto es adecuado para la producción de la espuma:

Temperatura del asfalto en el tanque. Debería medirse utilizando un termómetro calibrado (termocuplas adheridas al tanque no son confiables).

Calidad de espumación en el tanque. Esta deberá ser medida utilizando la boquilla de prueba de la recicladora. La verificación deberá realizarse una vez que al menos 100 litros de asfalto hayan pasado a través de la barra aplicadora de asfalto mientras se recicla, con el objetivo de obtener una muestra representativa.



### Flujo de asfalto

El asfalto suministrado en campo por tanques provistos de tubos calentados por llamas a veces es contaminado con pequeñas partículas de carbón que se forman a los costados de los tubos cuando estos aumentan su temperatura. Al utilizar las últimas toneladas de asfalto del tanque, estas partículas indeseables tienden a introducirse en el sistema de flujo de asfalto, y son la causa de los bloqueos en la recicladora. Este problema puede evitarse tomando precauciones mínimas como por ejemplo cerciorarse que el filtro en el sistema de abastecimiento funcione correctamente. Cualquier incremento inusual en la presión indicará que el filtro requiere de limpieza. En todo caso, es recomendable la limpieza diaria de este dispositivo (ej. al término de cada jornada de trabajo).

### Presión de asfalto

La calidad de la espuma es función directa de la presión de operación de la recicladora. Entre más alta la presión, mayor será el flujo de asfalto que tiende a “atomizarse” a medida que este pasa a través del surtidor de asfalto a la cámara de expansión. Esto asegura que las partículas pequeñas de asfalto entrarán en contacto con el agua, la cual también ingresará a la cámara de expansión en forma atomizada. Una presión mayor, asegurará uniformidad a la espuma de asfalto. Si el asfalto entra en la cámara de expansión en flujo (lo que sucede cuando ingresa a bajas presiones) el agua impactaría solamente una cara del flujo de asfalto. En esta cara se produce espuma, pero la otra continua como asfalto caliente sin espumar. Por lo tanto, es imperativo mantener una presión de operación sobre los 3 bares como mínimo.

### Aplicación de un filler activo

Como se describió anteriormente, es práctica común adicionar un porcentaje pequeño de cemento u otros agentes estabilizadores cementantes cuando se recicla con asfalto espumado. Esto debe ser realizado con precaución cuando se realiza un tratamiento previo con cemento, debido a que el proceso de hidratación comienza tan pronto como el agente estabilizador entra en contacto con la humedad, aglomerando los finos y reduciendo la fracción menor a 0,075 mm. La calidad de la mezcla cuando se agrega asfalto espumado será deficiente si el contenido de finos es bajo como para dispersar las partículas de asfalto. Por lo tanto, es recomendable que el cemento siempre sea agregado en conjunto con el asfalto espumado.



### Remezclado de la capa finalizada

El material estabilizado con asfalto espumado puede ser vuelto a trabajar sin afectar significativamente su resistencia última, siempre y cuando el contenido de humedad se mantenga aproximadamente constante y cercano al que presentaba al momento de la compactación. Esta característica es ventajosa cuando la carretera debe abrirse al tránsito vehicular poco después de haber sido construida, a pesar de que no se haya completado el trabajo. El material puede ser vuelto a trabajar el día siguiente (generalmente, después de una pulverización previa) y luego terminado en forma adecuada. Sin embargo, si éste pierde su humedad, volver a trabajarlo (perfilarlo y compactarlo) afectará negativamente su resistencia última.

### *Propiedades típicas de materiales estabilizados con asfalto espumado*

A continuación se describen las propiedades ingenieriles más importantes que respectan al material estabilizado con asfalto espumado. Estas propiedades se determinan cuando la aplicación del asfalto espumado es óptima, de acuerdo al procedimiento de diseño de mezclas. Los rangos de aplicación del asfalto espumado sugeridos son útiles para definir un contenido asfáltico aproximado en el diseño de mezclas. Estos rangos de aplicación generalmente son aplicables cuando se utiliza un 1% de filler activo (cal o cemento) en la mezcla.

**Tabla 2.** Contenido de asfalto espumado típico relativo a granulometría del agregado

Porcentaje que pasa por la malla: (%)		Porcentaje de asfalto espumado (% en peso sobre el agregado seco)
4.75 mm	0.075mm	
<50	3.0 - 5.0	2.0 a 2.5
	5.0 - 7.5	2.0 a 3.0
	7.5 - 10.0	2.5 a 3.5
	>10	3.0 a 4.0
>50	3.0 - 5.0	2.0 a 3.0
	5.0 - 7.5	2.5 a 3.5
	7.5 - 10.0	3.0 a 4.0
	>10	3.5 a 4.5

*Fuente: Wirtgen, 2004*

Nótese que los contenidos de asfalto espumado presentados en la tabla previa son sólo indicadores aproximados. El contenido óptimo de asfalto está definido por muchos otros factores además de la granulometría del agregado, y por lo tanto es imperativo que un diseño de mezclas sea efectuado para determinar el contenido óptimo de cada material (también debería tomarse en cuenta que no es un requisito aplicar siempre el contenido óptimo de asfalto cuando se estabiliza con asfalto espumado. Dependiendo de la aproximación del diseño, un rango de contenido asfáltico bajo el óptimo puede ser suficiente para conseguir las propiedades requeridas. Este rango de aplicación se denomina “contenido mínimo de asfalto”

### Resistencia

Para evaluar la resistencia de los materiales estabilizados con asfalto espumado se utiliza la resistencia a la tracción indirecta (ITS por sus siglas en inglés), en vez del ensayo Marshall. La siguiente tabla muestra los valores que comúnmente se obtienen de estos ensayos. El ensayo ITS puede ser realizado en especímenes de 100 mm o 150 mm. Además, la susceptibilidad a la humedad de los materiales generalmente se calcula en términos de la Resistencia a la Tracción Retenida (TSR por sus siglas en inglés). El TSR se determina usando especímenes de 100 mm según la ecuación 2:

$$TSR = \frac{ITS_{saturado}}{ITS_{seco}} \quad (2)$$

El valor de ITS saturado se obtiene sumergiendo los especímenes curadas en agua durante 24 horas antes de realizar el ensayo.

**Tabla 3.** Resistencia a la tracción indirecta de materiales estabilizados con asfalto espumado

Tipo de material	Especímenes 100mm MARSHALL		Especimen 150 mm Próctor
	ITS <sub>seco</sub> (kPa)	TSR	ITS <sub>equ</sub> (kPa)
RAP/Piedra chancada (mezcla 50/50)	250 a 600	0.8 a 1.0	120 a 250
Piedra changada graduada	200 a 500	0.6 a 0.9	120 a 200
Grava natural (IP<10,CBR<30)	150 a 450	0.3 a 0.75	80 a 150

*Nota: ITS<sub>equi</sub> espécimen a la humedad de equilibrio*

*Fuente: Wirtgen, 2004*

Investigaciones recientes han sugerido el uso de la Resistencia a la Compresión no Confinada (UCS por sus siglas en inglés) como indicador de la capacidad de soporte del material estabilizado (resistencia a la deformación permanente). Este es un valor importante, especialmente cuando se estabiliza material de baja calidad. Se propone un valor mínimo en UCS de 700 kPa para un espécimen de 150 mm de diámetro, confeccionada con un

esfuerzo de compactación del 100% del Proctor Modificado (curada y ensayada bajo el contenido óptimo de humedad).

### Rigidez

El Módulo Resiliente (MR) de un material estabilizado con asfalto puede ser medido en laboratorio si se somete un espécimen a un ensayo de carga repetitiva. El ensayo se realiza en especímenes Marshall de 100 mm de diámetro (curadas y secas) las cuales se cargan a tracción indirecta a 10 Hz y 25°C. Los valores típicos de rigidez se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla 4.** Rangos de módulos resilientes típicos para material estabilizado, ensayados en laboratorio

<b>Tipo de material</b>	<b>MR (MPa)</b>
RAP/ Piedra chancada (mezcla 50/50)	2500 a 4000
Piedra granular chancado	2000 a 3000
Grava natural (IP<10, CBR<30)	1500 a 3000

*Fuente: Wirtgen, 2004*

Nótese que debido principalmente a la pérdida de humedad en los especímenes ensayados (pero también debido a la geometría y estado de tensiones producido por la forma del ensayo), estos valores son significativamente mayores a aquellos determinados a partir de ensayos triaxiales dinámicos y de viga sometida a flexión, así como aquellos retrocalculados de un perfil de deflexión.

En el anexo A se presenta el Procedimiento de Diseño de para Materiales Estabilizados con Asfalto Espumado presentado en Manual de Reciclado en Frío de Wirtgen.



## 2. METODOLOGÍA PROPUESTA

### 2.1 Investigación bibliográfica relacionada con asfalto espumado

Esta fase comprende la revisión bibliográfica para registrar los estudios que se hayan realizado con anterioridad sobre asfaltos espumados. Entre los documentos que se estudiarán inicialmente se mencionan los siguientes:

INVE – 785 Diseño de mezclas de agregados con cemento asfáltico espumado

Norma interina de reciclado en frío de pavimentos con asfalto espumado. Propuesta de norma temporal a incluirse en el CR-2010

Thenoux, G.; Jamet, A. “Tecnología del asfalto espumado y diseño de mezcla”. Revista Ingeniería de Construcción Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile, 2002.

Wirtgen, FmbH. Cold Recycling Manual, Windhagen, Alemania. 2004

Jiménez, Mónica. “¿Qué es el asfalto espumado, se puede utilizar en Costa Rica?”. Boletín Técnico Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA). Vol 2. N° 13. Febrero 2011.

Eller, A.; Olson, R. Recycled Pavements Using Foamed Asphalt in Minnesota. Reporte N° MN/RC 2009-09. Departamento de Transportes de Minnesota. Estados Unidos. Febrero 2009

Thenoux, G.; Jamet, A. “Asfalto espumado: Tecnología y aplicaciones”. Revista Ingeniería de Construcción Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile, 2002.

Gonzalez, A. “Review of Structural Design Procedures for Foamed Bitumen Pavements”. AP-T188/11. Austroads Ltd. Sydney, Australia. Agosto 2011.

Adicionalmente se hará una revisión de artículos y publicaciones recientes en el uso de la tecnología de asfalto espumado en reciclado con el fin de identificar cuál es el estado del arte en cuanto a dichos procedimientos e identificar si ventajas adicionales, así como cuidados a tener para garantizar el correcto uso de la tecnología y evitar problemas en el desempeño de las capas tratadas con este material.

Informe LM-PI-UI-007-11	Fecha de emisión: 11 de octubre 2011	Página 25 de 51
-------------------------	--------------------------------------	-----------------



## **2.2 Recopilación de información existente relacionada con el tramo de aplicación de asfalto espumado**

En esta fase se busca recopilar la mayor cantidad de información disponible relacionada con el tramo de prueba donde se aplicará el asfalto espumado. En su mayoría, esta información será obtenida de la empresa Hernán Solís, esta empresa es la responsable del diseño, ejecución y construcción del tramo de prueba. Entre la información requerida se menciona: ubicación del proyecto, características generales del proyecto a realizar, características existentes del tramo de carretera, clima predominante, espesores de capas, ensayos de caracterización físico-mecánica de los materiales (contenido de humedad, granulometría, límites de Atterberg, CBR, Próctor, etc.), así como cualquier otro tipo de información relevante relacionada directamente con el proyecto.

## **2.3 Evaluación de las condiciones del tramo de prueba, previo a la aplicación de la metodología.**

En esta etapa se realizará una evaluación de las condiciones del tramo, previo a la aplicación de cualquiera de las actividades de estabilización con asfalto espumado. En este sentido, se pretende realizar ensayos de:

**ASTM D4694 Método de Ensayo Estándar para la Determinación de Deflexiones haciendo uso de un Deflectómetro de Impacto (FWD):** Este método de ensayo establece el procedimiento de determinación de las deflexiones sobre la superficie del pavimento como resultado de la aplicación de un impulso de carga a la superficie del pavimento. Las deflexiones resultantes son medidas bajo la carga aplicada y varias ubicaciones alejándose del punto de impacto. Cada ensayo consiste en una prueba no destructiva para la medición de las deflexiones superficiales del pavimento. Esta información puede ser usada para la evaluación estructural de pavimentos nuevos o en servicio.

**Levantamiento fotográfico mediante el equipo Geo3D:** Mediante este equipo se realiza un levantamiento fotográfico de la carretera, por medio de cámaras de alta definición. Con la información obtenida se puede realizar una auscultación visual de la carretera de una forma más rápida y precisa para la determinación de los deterioros y del estado de la infraestructura vial, así como también se pueden



recopilar datos del señalamiento vial. Toda la información recopilada puede ser georeferenciada con GPS y utilizada en Sistemas de Información Geográfica (GIS).

**ASTM D6951 Ensayo con el cono de penetración dinámico (ADCP):** Este ensayo cubre la medición de la tasa de penetración del Penetrómetro Dinámico con un martillo de 8 kg, en suelos inalterados y/o materiales compactados. Los resultados del ensayo son típicamente utilizados para pavimentos para estimar el CBR en sitio, para identificar espesores de estratos, resistencia cortante del estrato, y otras propiedades del material.

**Evaluación visual:** Mediante esta metodología se realiza un levantamiento de los deterioros, se marcan estacionamientos y se identifica cualquier otro elemento importante que podría no ser medido de manera adecuada por equipos de levantamiento o evaluación de alto desempeño.

## **2.4 Evaluación en laboratorio de los materiales en los cuales se ha aplicado la metodología de estabilización con asfalto espumado.**

Con la finalidad de evaluar el material estabilizado con asfalto espumado, en esta etapa se preparan y se realizarán los ensayos de caracterización físico-mecánica del material estabilizado. Por ello se pretende elaborar especímenes compactados en campo con el material recién estabilizado. Además, con la finalidad de evaluar la existencia o no de variaciones en los resultados debido al remoldeo del material, se plantea traer al laboratorio material suelto obtenido después de la estabilización, para preparar especímenes compactados en laboratorio inmediatamente después de recibir la muestra en el Laboratorio y después de 24 horas, aproximadamente, después de que fuese estabilizado en campo el material. En todos los casos se prepararán especímenes de 100 mm de diámetro (4 pulgadas) y de 150 mm (6 pulgadas) y se ensayarán a la tensión diametral, compresión uniaxial, resistencia retenida y módulo resiliente, según corresponda. Así pues, entre los ensayos que se realizarán se mencionan:

- IT-MB-04 Elaboración de especímenes Marshall de 4 pulg en campo y en laboratorio
- Elaboración de especímenes de 6 pulg con Próctor Modificado en campo y en laboratorio
- Tracción indirecta de especímenes de 4 pulg compactados en laboratorio y campo
- Resistencia retenida de especímenes de 4 pulg compactados en laboratorio y campo

Informe LM-PI-UI-007-11	Fecha de emisión: 11 de octubre 2011	Página 27 de 51
-------------------------	--------------------------------------	-----------------



Módulo resiliente (TD) de especímenes de 4 pulg compactados en laboratorio y campo

Tracción indirecta de especímenes de 6 pulg compactados en laboratorio y campo

Compresión uniaxial a especímenes de 6 pulg compactados en laboratorio y campo

## **2.5 Evaluación en campo de la condición inicial del tramo después de la aplicación del asfalto espumado**

En esta etapa se realizará una evaluación de las condiciones del tramo inmediatamente después de la aplicación de la metodología de estabilización con asfalto espumado. Con estos datos se busca realizar una comparación de las mediciones realizadas antes y después de la aplicación de la metodología y establecer así de manera cuantitativa y cualitativa la efectividad de la metodología empleada. En este sentido, se pretende realizar ensayos de:

**ASTM D4694 Método de Ensayo Estándar para la Determinación de Deflexiones haciendo uso de un Deflectómetro de Impacto (FWD):** Ver la descripción anterior.

**Levantamiento fotográfico mediante el equipo Geo3D:** Ver la descripción anterior.

**Evaluación visual:** Ver la descripción anterior.

**Método de ensayo estándar para la determinación del índice de regularidad internacional (IRI) mediante un perfilómetro inercial (RSP):** Este método de ensayo involucra la medición y registro del perfil de la superficie recorrida por un vehículo con un acelerómetro estableciendo una referencia inercial entre el perfil de la carretera y el vehículo. Con estos datos se calcula el índice de regularidad internacional, IRI, el cual se define como la suma de aceleraciones verticales no deseadas que sufre el usuario de una carretera al circular por ella, las cuales son provocadas por las desviaciones del perfil longitudinal real respecto al perfil teórico de proyecto. Es un índice de comodidad de rodadura que influye en la seguridad y en el costo de operación de los vehículos.

**IT-LC-01 Extracción de núcleos de mezcla asfáltica (4 pulg):** Como se describió anteriormente un componente fundamental en cualquier análisis es la variabilidad de los resultados. Como tal, se considera muy importante evaluar la uniformidad de la capa o capas construidas. Para este propósito se prevé extraer núcleos con el fin de medir los espesores de capa a lo largo del proyecto. Adicionalmente, los núcleos

Informe LM-PI-UI-007-11	Fecha de emisión: 11 de octubre 2011	Página 28 de 51
-------------------------	--------------------------------------	-----------------



pueden ser ensayados en el laboratorio posteriormente para corroborar algunas de las propiedades medidas usando el material remodelado.

## **2.6 Monitoreo del desempeño en campo en el corto plazo de tramos estabilizados con asfalto espumado**

En esta etapa se realizará una evaluación de las condiciones del tramo después de 6 a 12 meses posteriores a la aplicación de la metodología de estabilización con asfalto espumado. Con estos datos se busca realizar una comparación de las mediciones realizadas inmediatamente después de la aplicación de la metodología y en el momento de la evaluación, con la intención de establecer de manera cuantitativa y cualitativa la evolución del desempeño a corto plazo de la metodología empleada. Así pues, se realizarán mediciones periódicas de:

**ASTM D4694 Método de Ensayo Estándar para la Determinación de Deflexiones haciendo uso de un Deflectómetro de Impacto (FWD):** Ver la descripción anterior.

**Levantamiento fotográfico mediante el equipo Geo3D:** Ver la descripción anterior.

**Evaluación visual:** Ver la descripción anterior.

**Método de ensayo estándar para la determinación del índice de regularidad internacional (IRI) mediante un perfilómetro inercial (RSP):** Ver la descripción anterior.

## **2.7. Análisis de resultados, hallazgos y observaciones**

En esta etapa se analizarán y discutirán los hallazgos y observaciones principales, en términos de las especificaciones, estándares, políticas y procedimientos utilizados que permitan mejorar la implementación de la estabilización con asfaltos espumados en campo. Se analizará la influencia que tienen las propiedades de los materiales, el procedimiento constructivo y sus efectos en el desempeño, economía, durabilidad. Además, se discutirán las limitaciones existentes para que sean tomadas en cuenta en futuros proyectos de investigación o bien, en la construcción de nuevos tramos de carretera.

## **2.8 Elaboración de informes, publicaciones, manuales y productos**

En esta fase se elaborarán los informes parciales y/o finales del desarrollo del proyecto y se publicarán los resultados, manuales y demás productos que se puedan obtener de la investigación.

Informe LM-PI-UI-007-11	Fecha de emisión: 11 de octubre 2011	Página 29 de 51
-------------------------	--------------------------------------	-----------------



### 3. RESULTADOS / PRODUCTOS ESPERADOS

	Artículo científico en revista indexada		Libro
x	Artículo científico en revista no indexada		Capítulo de libro
x	Artículo de divulgación	X	Especificaciones técnicas
x	Ponencias en congresos		Hardware
x	Conferencias o seminarios		Software
	Patentes		Trabajos o proyectos de graduación
	Diseño de cursos	X	Nuevas metodologías
	Formación de la comunidad científica		

#### Generación de nuevo conocimiento: Científico y/o Académico

Resultado/Producto esperado	Indicador	Beneficiario
Evaluación del desempeño en campo de materiales estabilizados con asfalto espumado	Publicaciones	Grupo de investigación involucrado el proyecto
Implementación de la metodología en laboratorio y construcción en campo de materiales estabilizados con asfalto espumado	Metodología	Consultores, constructores, administradores, laboratorios e ingenieros relacionados con sector vial del país.

#### Impacto a nivel nacional en la comunidad científica

Resultado/Producto esperado	Indicador	Beneficiario
Interacción con laboratorios y consultores	Trabajo conjunto	Grupo de investigación involucrado el proyecto
Formación de jóvenes investigadores	Participación de asistentes de investigación	Grupo de investigación involucrado el proyecto
Especificaciones técnicas	Redacción de los resultados en especificaciones	Grupo de investigación involucrado el proyecto, consultores, constructores, administradores, laboratorios e ingenieros relacionados con sector vial del país.

#### Beneficios sociales y/o culturales

Informe LM-PI-UI-007-11	Fecha de emisión: 11 de octubre 2011	Página 30 de 51
-------------------------	--------------------------------------	-----------------



Resultado/Producto esperado	Indicador	Beneficiario
Convenios de participación entre administradores, gobiernos locales, consultores, laboratorios, etc. en la aplicación de la metodología	Trabajo conjunto	Consultores, constructores, administradores, laboratorios e ingenieros relacionados con sector vial del país.

Fortalecimiento de vínculos de apoyo y reconocimiento de la Universidad de Costa Rica con el sector externo

Resultado/Producto esperado	Indicador	Beneficiario
Artículo científico en revista no indexada	Publicaciones	Grupo de investigación involucrado el proyecto
Ponencias en congresos, seminarios y/o simposios	Ponencias	
Fortalecimiento de vínculos de apoyo y reconocimiento	Cooperación científica	

#### 4. CONFORMACIÓN DEL GRUPO DE INVESTIGACIÓN

En este apartado se designará el equipo de investigación que será responsable de la ejecución del proyecto de investigación, así como el tiempo que le dedicará a la misma.

**Tabla 5.** Responsables del proyecto de investigación

Investigador / Colaborador	Grado académico	Estado en régimen	Función en el proyecto	Dedicación semanal (horas)	Meses
Gustavo Badilla Vargas	Licenciatura	Interino	Investigador asociado	5	4
Tania Ávila Esquivel	Licenciatura	Interino	Investigador asociado	5	4
Adriana Duarte Pedroza	Estudiante	Estudiante	Asistente de investigación	2	4

## 5. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

Una vez reconocidas las etapas que formarán parte de la investigación se definirá el cronograma para la realización de las actividades, lo cual permitirá una adecuada utilización de los recursos, una optimización del tiempo y el logro de los objetivos planteados.

ETAPA O FASE DE LA INVESTIGACIÓN	Ensayo	Fechas propuestas	Observaciones
EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES DEL TRAMO DE PRUEBA, PREVIO A LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA	Evaluación visual del tramo	29 de setiembre	
	ASTM D4694 Deflectometría de impacto	Sem. del 3 - 7 de octubre	
	Mediciones con el Geo3D (levantamiento fotográfico)	Sem. del 3 - 7 de octubre	
	Ensayo con el cono de penetración dinámico automatizado (ADCP)	Sem. del 3 - 7 de octubre	
	IT-GC-02 Contenido de humedad en suelos y rocas	Sem. del 3 - 7 de octubre	
EVALUACIÓN EN LABORATORIO DE LOS MATERIALES EN LOS CUALES SE HA APLICADO LA METODOLOGÍA DE ESTABILIZACIÓN CON ASFALTO ESPUMADO	IT-MB-04 Elaboración de especímenes Marshall de 4 pulg en sitio	Noviembre. Durante el periodo de construcción del proyecto	La fecha exacta y duración de esta etapa dependerá de la programación de empresa Hernán Solís, encargada de construir el tramo de prueba de asfalto espumado.
	IT-MB-04 Elaboración de especímenes Marshall de 4 pulg en laboratorio		
	IT-MB-04 Elaboración de especímenes Marshall de 4 pulg en laboratorio (24 horas despues de mezcla de asfalto espumado traído al laboratorio)		
	Preparación de especímenes de 6 pulg con Proctor Modificado en campo		
	Preparación de especímenes de 6 pulg con Proctor Modificado en laboratorio		
	Preparación de especímenes de 6 pulg con Proctor Modificado en laboratorio (24 horas despues de mezcla de asfalto espumado traído al laboratorio)		
	Tracción indirecta de especímenes de 4 pulg compactados en laboratorio y campo		
	Resistencia retenida de especímenes de 4 pulg compactados en laboratorio y campo		
	Módulo resiliente (TD) de especímenes de 4 pulg compactados en laboratorio y campo		
	Tracción indirecta de especímenes de 6 pulg compactados en laboratorio y campo		
Compresión uniaxial a especímenes de 6 pulg compactados en laboratorio y campo			
EVALUACIÓN EN CAMPO DE LA CONDICIÓN INICIAL DEL TRAMO DESPUÉS DE LA APLICACIÓN DEL ASFALTO ESPUMADO	Evaluación visual del tramo	5 de diciembre	
	ASTM D4694 Deflectometría de impacto	Sem. del 5-8 de diciembre	
	ASTM E950 Mediciones con perfilómetro láser	Sem. del 5-8 de diciembre	
	Mediciones con el Geo3D (levantamiento fotográfico)	Sem. del 5-8 de diciembre	
MONITOREO DEL DESEMPEÑO EN CAMPO EN EL CORTO PLAZO DE TRAMOS ESTABILIZADOS CON ASFALTO ESPUMADO	ASTM D4694 Deflectometría de impacto	Evaluación en Marzo, Julio, Noviembre del 2012	
	ASTM E950 Mediciones con perfilómetro láser		
	Mediciones con el Geo3D (levantamiento fotográfico)		

## 6. RECURSOS NECESARIOS

En este apartado debe definirse los recursos necesarios para la ejecución adecuada del proyecto de investigación.

**Tabla 6.** Administración, transporte de materiales y ponencias (US\$)

<b>Descripción</b>	<b>Justificación</b>	<b>Valor</b>
Publicaciones	Recopilación de información, libros y publicaciones en revistas nacionales e internacionales requeridas para la ejecución del proyecto de investigación	200
Equipos	Necesidad de nuevos ensayos para cumplir con el alcance del proyecto	-
Papelería, fotocopias, transportes y viáticos	Informes, publicaciones, documentación, transporte de muestras de ensayo, viáticos para elaboración o mediciones, etc.	1000
Participación en congresos	Presentación de los resultados en eventos nacionales y/o internacionales de relevancia	500
<b>Total</b>		<b>1700</b>



**Tabla 7.** Descripción de los ensayos de campo/laboratorio a realizar

Ensayo	Justificación	Cantidad	Costo	
ASTM D4694 Deflectometría de impacto	EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES DEL TRAMO DE PRUEBA, PREVIO A LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA	120 puntos (@25m en zigzag)		
Mediciones con el Geo3D (levantamiento fotográfico)		@5m		
Ensayo con el cono de penetración dinámico automatizado (ADCP)		30 puntos (@100m)		
IT-GC-02 Contenido de humedad en suelos y rocas		10 puntos (@300m)		
IT-MB-04 Elaboración de especímenes Marshall de 4 pulg en sitio	EVALUACIÓN EN LABORATORIO DE LOS MATERIALES EN LOS CUALES SE HA APLICADO LA METODOLOGÍA DE ESTABILIZACIÓN CON ASFALTO ESPUMADO	6 especímenes por punto		
IT-MB-04 Elaboración de especímenes Marshall de 4 pulg en laboratorio		6 especímenes por punto		
IT-MB-04 Elaboración de especímenes Marshall de 4 pulg en laboratorio (24 horas después de mezcla de asfalto espumado traído al laboratorio)		6 especímenes por punto		
Preparación de especímenes de 6 pulg con Próctor Modificado en campo		4 especímenes por punto		
Preparación de especímenes de 6 pulg con Próctor Modificado en laboratorio		4 especímenes por punto		
Preparación de especímenes de 6 pulg con Próctor Modificado en laboratorio (24 horas después de mezcla de asfalto espumado traído al laboratorio)		4 especímenes por punto		
Tracción indirecta de especímenes de 4 pulg compactados en laboratorio y campo		6 especímenes por punto		
Resistencia retenida de especímenes de 4 pulg compactados en laboratorio y campo		6 especímenes por punto		
Módulo resiliente (TD) de especímenes de 4 pulg compactados en laboratorio y campo		6 especímenes por punto		
Tracción indirecta de especímenes de 6 pulg compactados en laboratorio y campo		6 especímenes por punto		
Compresión uniaxial a especímenes de 6 pulg compactados en laboratorio y campo		6 especímenes por punto		
IT-LC-01 Extracción de núcleos de mezcla asfáltica (4 pulg)		EVALUACIÓN EN CAMPO DE LA CONDICIÓN INICIAL DEL TRAMO DESPUÉS DE LA APLICACIÓN DEL ASFALTO ESPUMADO	4 núcleos por punto	
ASTM D4694 Deflectometría de impacto			120 puntos (@25m en zigzag)	
ASTM E950 Mediciones con perfilómetro láser	@5m, perfil longitudinal @250mm			
Mediciones con el Geo3D (levantamiento fotográfico)	@5m			
ASTM D4694 Deflectometría de impacto	MONITOREO DEL DESEMPEÑO EN CAMPO EN EL CORTO PLAZO DE TRAMOS ESTABILIZADOS CON ASFALTO ESPUMADO	30 puntos (@100 m en zigzag)		
ASTM E950 Mediciones con perfilómetro láser		@5m, perfil longitudinal @250mm		
Mediciones con el Geo3D (levantamiento fotográfico)		@5m		



## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- INVE – 785 Diseño de mezclas de agregados con cemento asfáltico espumado  
Norma interina de reciclado en frío de pavimentos con asfalto espumado. Propuesta de norma temporal a incluirse en el CR-2010
- Thenoux, G.; Jamet, A. “Tecnología del asfalto espumado y diseño de mezcla”. Revista Ingeniería de Construcción Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile, 2002.
- Wirtgen, FmbH. Cold Recycling Manual, Windhagen, Alemania. 2004
- Jiménez, Mónica. “¿Qué es el asfalto espumado, se puede utilizar en Costa Rica?”. Boletín Técnico Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA). Vol 2. N° 13. Febrero 2011.
- Eller, A.; Olson, R. Recycled Pavements Using Foamed Asphalt in Minnesota. Reporte N° MN/RC 2009-09. Departamento de Transportes de Minnesota. Estados Unidos. Febrero 2009
- Thenoux, G.; Jamet, A. “Asfalto espumado: Tecnología y aplicaciones”. Revista Ingeniería de Construcción Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile, 2002.
- Jenkins, K.; Collings, D.; Theyse, H.; Long, F. “Interim Technical Guideline TG2: The Design and Use of Foamed Bitumen Treated Materials”. ISBN 0-7988-5543-3. Asphalt Academy, Pretoria, South África, 2002.
- Gonzalez, A. “Review of Structural Design Procedures for Foamed Bitumen Pavements”. AP-T188/11. Austroads Ltd. Sydney, Australia. Agosto 2011.



## **ANEXO A. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE PARA MATERIALES ESTABILIZADOS CON ASFALTO ESPUMADO (WIRTGEN, 2004).**

*Preparación de Materiales Estabilizados con Asfalto Espumado:*

### Determinación de las Propiedades de Espumación del Asfalto

Las propiedades de espumación de cada tipo de asfalto están caracterizadas por la Tasa de Expansión y Vida Media.

El objetivo es determinar la temperatura y el porcentaje de agua requerida para producir las mejores condiciones de generación de espuma (máxima tasa de expansión y vida media) para un asfalto en particular. La combinación óptima se determina a partir de tres diferentes temperaturas del asfalto como se establece a continuación:

**PASO 1:** Calentar el asfalto en el recipiente calentador del laboratorio Wirtgen WLB 10 con la bomba circulando asfalto por el sistema, hasta alcanzar la temperatura requerida (normalmente comenzando con 160 °C). Mantener la temperatura requerida durante al menos 5 minutos antes de comenzar las pruebas.

**PASO 2:** Calibrar la razón de descarga de asfalto y ajustar el temporizador en el laboratorio Wirtgen WLB 10 para descargar 500 g de asfalto.

**PASO 3:** Ajustar el medidor de caudal de agua para alcanzar la razón de inyección requerida de agua (normalmente comenzando con un 2 % de la masa de asfalto).

**PASO 4:** Descargar asfalto espumado dentro de un recipiente de acero precalentado ( $\pm 75$  °C) durante un tiempo de rocío calculado para 500 g de asfalto. Inmediatamente después que la descarga de espuma se detiene, comenzar a medir el tiempo con un cronómetro.

**PASO 5:** Utilizando la varilla de aceite suministrada con el Wirtgen WLB 10 (la cual está calibrada para un recipiente de acero de 275 mm de diámetro y 500 g de asfalto) medir la altura máxima alcanzada por el asfalto espumado en el recipiente. Esto es registrado como el volumen máximo.

**PASO 6:** Usar el cronómetro para medir el tiempo, en segundos, que transcurre para que la espuma colapse a la mitad de su volumen máximo. Este tiempo es registrado como la vida media del asfalto espumado.

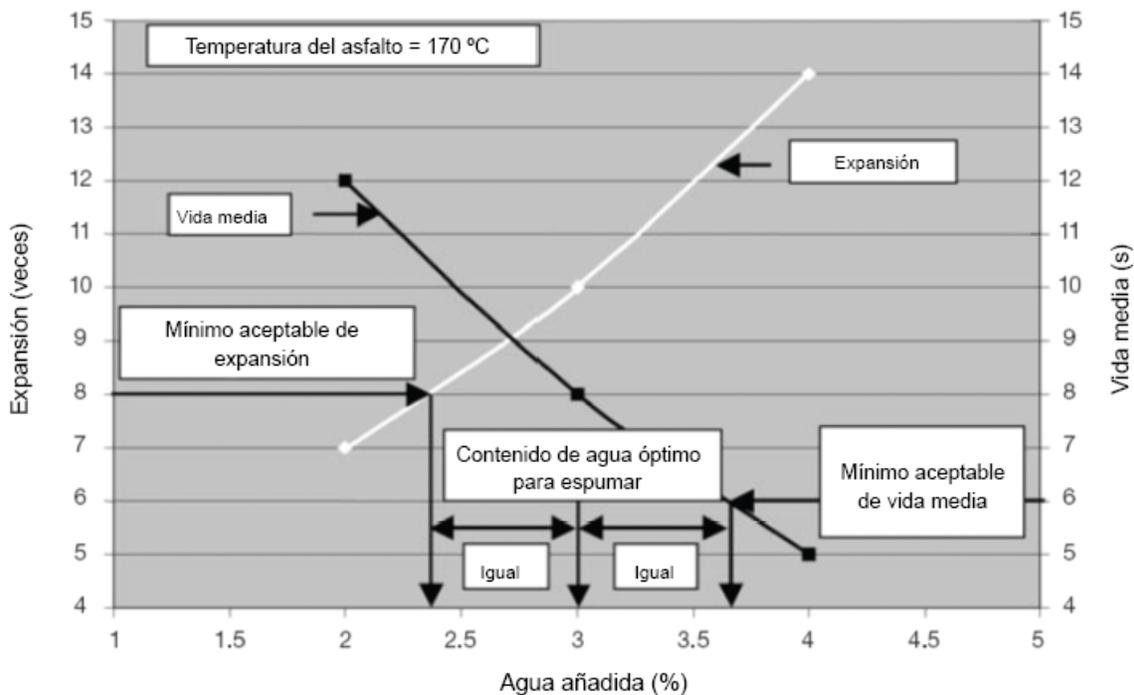
Informe LM-PI-UI-007-11	Fecha de emisión: 11 de octubre 2011	Página 36 de 51
-------------------------	--------------------------------------	-----------------

**PASO 7:** Repetir el procedimiento anterior tres veces o hasta alcanzar lecturas similares.

**PASO 8:** Repetir los pasos 3 al 7 para un rango de al menos tres razones de inyección de agua. Típicamente se usan valores de 2 %, 3 % y 4 % por la masa de asfalto.

**PASO 9:** Trazar un gráfico de la tasa de expansión versus vida media para las diferentes razones de inyección de agua sobre los mismos ejes; La adición óptima de agua es escogida como un promedio de los dos contenidos de agua requeridos para encontrar los criterios mínimos.

Repetir el Paso 1 a 9 para otras dos temperaturas de asfalto (normalmente 170 y 180 °C).



**FIGURA 5.** DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE AGUA PARA LA ESPUMACIÓN  
*Fuente: Wirtgen, 2004*

La temperatura y la adición óptima de agua que produce la mejor espuma son usadas posteriormente en el procedimiento de diseño de mezclas descrito a continuación.



### Preparación de Muestras para Tratamientos con Asfalto Espumado

**PASO 1:** Colocar la cantidad de muestra requerida dentro de un contenedor mezclador adecuado (10 kg para elaborar especímenes de 100 mm de diámetro, o 20 kg para especímenes de 150 mm de diámetro).

**PASO 2:** Determinar la masa seca de la muestra usando la **ecuación 3**

$$M_{sample} = M_{air-dry} / \left(1 + (W_{air-dry} / 100)\right) \quad (3)$$

Donde:

$M_{sample}$  = masa seca de la muestra [g]  
 $M_{air-dry}$  = masa seca al aire de la muestra [g]  
 $W_{air-dry}$  = contenido de humedad de la muestra seca al aire [%]

**PASO 3:** Determinar el porcentaje requerido de filler activo (cal o cemento) usando la **ecuación 4.**

$$M_{cement} = (C_{add} / 100) \times M_{sample} \quad (4)$$

Donde:

$M_{sample}$  = masa seca de la muestra [g]  
 $C_{add}$  = porcentaje de cal o cemento requerido [g]  
 $M_{cement}$  = masa de cal o cemento requerido [g]

**PASO 4:** Determinar el porcentaje de agua a ser agregada para lograr un mezclado óptimo usando la **ecuación 5.** Luego determinar la masa de agua a ser agregada a la muestra usando la **ecuación 6:**

$$W_{add} = 1 + (0.5 W_{OMC} - W_{air-dry}) \quad (5)$$

$$M_{water} = (W_{add} / 100) \times (M_{sample} + M_{cement}) \quad (6)$$

Donde:

$W_{add}$  = Agua agregada a la muestra [%]  
 $W_{OMC}$  = contenido óptimo de humedad [%]  
 $W_{air-dry}$  = contenido de humedad de la muestra seca al aire [%]  
 $M_{water}$  = masa de agua agregada [g]  
 $M_{sample}$  = masa seca de la muestra [g]  
 $M_{cement}$  = masa de cal o cemento requerido [g]

Informe LM-PI-UI-007-11	Fecha de emisión: 11 de octubre 2011	Página 38 de 51
-------------------------	--------------------------------------	-----------------

**PASO 5:** Mezclar el material, el filler activo, y el agua en una mezcladora hasta que la mezcla sea uniforme.

Nota: Inspeccionar la muestra después del mezclado para asegurar que el material no quede adherido a las paredes del mezclador. Si esta situación ocurre, mezclar una muestra nueva con un contenido de humedad inferior. Comprobar que el material se mezcla fácilmente y permanece en un estado suelto o esponjado. Si alguna partícula de polvo es observada al final del proceso de mezclado, agregar pequeñas cantidades de agua y mezclar nuevamente hasta alcanzar un estado suelto sin polvo.

**PASO 6:** Determinar el asfalto espumado a ser agregado usando la **ecuación 7:**

$$M_{bitumen} = (B_{add}/100) \times (M_{sample} + M_{cement}) \quad (7)$$

Donde:

$M_{bitumen}$  = masa de asfalto agregado [g]  
 $B_{add}$  = contenido de asfalto espumado [% Massenanteil]  
 $M_{sample}$  = masa seca de la muestra [g]  
 $M_{cement}$  = masa de cal o cemento requerido [g]

**PASO 7:** Determinar el ajuste del temporizador en el Wirtgen WLB 10 usando la **ecuación 8:**

$$T = Factor \times (M_{bitumen} + Q_{bitumen}) \quad (8)$$

Donde:

T = tiempo de ajuste en el temporizador del WLB 10 [s]  
 $M_{bitumen}$  = masa de asfalto agregado [g]  
 $Q_{bitumen}$  = caudal de asfalto para el WLB 10 [g/s]

Factor = compensación de pérdidas de asfalto en el equipo mezclador. La experiencia ha demostrado que un factor de 1.1 es aplicable al usar un mezclador Hobart y 1.0 usando un mezclador tipo tornillo.

**PASO 8:** Colocar el mezclador mecánico adyacente al laboratorio de espumado de modo que el asfalto espumado pueda ser descargado directamente en el mezclador.

**PASO 9:** Comenzar el mezclado y dejar mezclando durante al menos 10 segundos antes de descargar la masa de asfalto espumado requerida dentro del mezclador. Seguir mezclando durante 30 segundos más, después de que el asfalto espumado se ha descargado dentro del mezclador.

**PASO 10:** Determinar la cantidad de agua requerida para que la muestra alcance el contenido de humedad óptimo usando la **ecuación 9**.

$$M_{plus} = (W_{OMC} - W_{sample}) 100 \times (M_{sample} + M_{cement}) \quad (9)$$

donde:

$M_{plus}$	= masa de agua agregada	[g]
$W_{OMC}$	= contenido óptimo de humedad	[%]
$W_{sample}$	= contenido de humedad de la muestra preparada	[%]
$M_{sample}$	= masa seca de la muestra	[g]
$M_{cement}$	= masa de cal o cemento requerido	[g]

**PASO 11:** Agregar la cantidad de agua adicional y mezclar hasta alcanzar uniformidad.

**PASO 12:** Traspasar el material tratado con asfalto espumado a un contenedor y sellarlo inmediatamente para conservar la humedad. Para reducir al mínimo la pérdida de humedad de la muestra preparada, elaborar cuanto antes los especímenes siguiendo los procedimientos pertinentes a especímenes de 100 mm o 150 mm de diámetro.

Repetir los pasos anteriores para un mínimo de cuatro contenidos diferentes de asfalto espumado.

#### Fabricación de especímenes de 100 mm de diámetro

##### *Compactación (Método Marshall)*

**PASO 1:** Preparar el molde y martillo Marshall limpiando el molde, collar, plato base y la cara de compactación del martillo. Nota: el equipo de compactación no debe ser previamente calentado, sino mantenerse a temperatura ambiente.



**PASO 2:** Pesar material suficiente para alcanzar una altura de compactación de 63.5 mm  $\pm$  1.5 mm (usualmente 1150 g). Punzar 15 veces la mezcla con una espátula alrededor del perímetro y 10 veces en la superficie, dejando la superficie levemente redondeada.

**PASO 3:** Compactar la mezcla aplicando 75 golpes con el martillo de compactación. Debe asegurarse que el martillo caiga libremente.

**PASO 4:** Retirar el molde y el collar del pedestal, invertir el espécimen (dar vuelta). Volver a colocar y presionar firmemente para asegurarse que descansa firmemente sobre el plato base. Compactar la otra cara del espécimen aplicando nuevamente 75 golpes.

**PASO 5:** Después de la compactación, retirar el molde del plato base y desmoldar el espécimen por medio de un extrusor.

Nota: Con ciertos materiales que carecen de cohesión, puede ser necesario dejar los especímenes en el molde durante 24 horas para desarrollar la resistencia deseada antes de extraerlas.

*Procedimiento de Curado:*

Colocar los especímenes sobre una bandeja plana y curar en un horno con aire forzado durante 72 horas a 40 °C. Retirar del horno después de 72 horas y dejar enfriar a temperatura ambiente.

*Determinación de la Densidad Bruta:*

Después de enfriar cada espécimen a temperatura ambiente:

**PASO 1:** Determinar la masa.

**PASO 2:** Medir la altura en cuatro sitios uniformemente espaciados alrededor de la circunferencia y calcule la altura promedio.

**PASO 3:** Medir el diámetro.

**PASO 4:** Calcule la densidad bruta usando la **ecuación 10**

$$BD = (4 \times M_{briq}) / (\pi \times d^2 \times h) \times 1000 \quad (10)$$

donde:

Informe LM-PI-UI-007-11	Fecha de emisión: 11 de octubre 2011	Página 41 de 51
-------------------------	--------------------------------------	-----------------



BD = densidad bruta [kg/m<sup>3</sup>]  
 $M_{briq}$  = masa del espécimen [g]  
h = altura promedio del espécimen [cm]  
d = diámetro del espécimen [cm]

Excluya cualquier espécimen cuya densidad bruta difiera del promedio en más de 50 kg/m<sup>3</sup>.

Nota: La densidad bruta puede ser verificada usando el método de “peso en aire/peso en agua”.

### Determinación del Contenido Óptimo de Asfalto para Materiales Estabilizados con Asfalto

Los especímenes de 100 mm de diámetro son ensayadas por resistencia a la tracción indirecta bajo condición seca y saturada siguiendo el procedimiento descrito anteriormente.

Los resultados de los ensayos de ITS en condición seca y saturada son graficados con respecto al contenido de asfalto respectivo que fue agregado. El contenido de asfalto óptimo es aquel que permite alcanzar las mejores propiedades deseadas.

#### *Fabricación de especímenes de 150 mm de diámetro:*

Cuando la exigencia de capacidad estructural del pavimento es superior a 5 millones de Ejes Equivalentes de Carga (ESALs por sus siglas en inglés), se recomienda que los ensayos de UCS e ITS sean realizados con el contenido de humedad de equilibrio.

Debido a la cantidad de material requerido para estos ensayos, los especímenes se preparan normalmente únicamente con el contenido óptimo de asfalto. Sin embargo, se pueden utilizar contenidos de asfalto adicionales para determinar la susceptibilidad de estos materiales, especialmente a las variaciones en el contenido de filler activo. Los procedimientos descritos a continuación requieren la fabricación de cuatro especímenes de 150 mm de diámetro. Normalmente dos de estos especímenes son ensayadas bajo ITS y dos bajo UCS. Si se requieren especímenes adicionales, se debe aumentar la cantidad de material muestreado.



*Compactación (Método AASHTO T-180 Modificado):*

**PASO 1:** Preparar 24 kg de muestra con el contenido de asfalto óptimo

**PASO 2:** Cuando se requiera, añadir la humedad suficiente para lograr que la muestra alcance el contenido de humedad óptima de compactación y mezclar hasta que esté uniforme. Inmediatamente después del mezclado, colocar el material en un contenedor hermético.

**PASO 3:** Tomar mediciones de peso representativas ( $\pm 1$  kg) del primer y tercer del espécimen compactado y secar hasta obtener una masa constante. Determinar la humedad de cada del espécimen usando la **ecuación 11:**

$$W_{mould} = (M_{moist} - M_{dry}) M_{dry} \times 100 \quad (11)$$

Donde:

$W_{mould}$  = contenido de humedad del espécimen [%]  
 $M_{moist}$  = masa de material húmedo [g]  
 $M_{dry}$  = masa de material seco [g]

**PASO 4:** Compactar al menos cuatro especímenes usando un molde de 150 mm de diámetro, aplicando el esfuerzo de compactación AASHTO (T-180) modificado (5 capas de 25 mm de espesor aproximadamente, 55 golpes por capa usando un martillo de 4.536 kilogramos con una caída de 457 mm).

**PASO 5:** Apartar cuidadosamente el exceso de material del molde como se especifica en el método de ensayo AASHTO T-180.

**PASO 6:** Remover cuidadosamente los especímenes del molde y ubicarlas en una bandeja plana. Dejarlas a temperatura ambiente durante 24 horas o hasta que el contenido de humedad se haya reducido al menos al 50 % del OMC.

Nota: Con ciertos materiales que carecen de cohesión, puede ser necesario dejar los especímenes en el molde durante 24 horas para desarrollar la resistencia deseada antes de extraerlas.



*Procedimiento de Curado.*

**PASO 1:** Colocar cada espécimen en una bolsa plástica sellada (de al menos dos veces el volumen del espécimen) y colocar en horno a 40 ° C durante 48 horas.

**PASO 2:** Sacar los especímenes del horno pasadas las 48 horas y sacarlas de sus bolsas plásticas respectivas, asegurando que cualquier humedad presente en las bolsas no entre en contacto con los especímenes. Dejar enfriar a temperatura ambiente.

**PASO 3:** Después de enfriar a temperatura ambiente, determinar la masa de cada espécimen.

**PASO 4:** Calcular la densidad bruta usando la **ecuación 12:**

$$BD_{mould} = (M_{briq}/vol) \times 1000 \quad (12)$$

Donde:

$BD_{mould}$  = densidad bruta del espécimen [kg/m<sup>3</sup>]  
 $M_{briq}$  = masa del espécimen [g]  
Vol = volumen del espécimen [cm<sup>3</sup>]

Los especímenes deben ser ensayadas cuanto antes para prevenir la pérdida de humedad.

*Determinación de la Resistencia de los Materiales Estabilizados con Asfalto:*

Los especímenes de 150 mm de diámetro son ensayadas a ITS y UCS siguiendo los procedimientos descritos en la sección de procedimientos de ensayos de resistencia. Los valores de ITS y UCS obtenidos son usados para estimar el comportamiento del material en el pavimento.

Procedimientos de Ensayo de Resistencia

*Determinación de la Resistencia a la Tracción Indirecta (ITS)*

El ITS es usado para ensayar especímenes bajo diferentes condiciones de humedad: seco, saturado y contenido de humedad de equilibrio. El ITS es determinado midiendo la carga última de falla de un espécimen sujeta a una razón de deformación constante de 50.8 mm/minuto sobre su eje diametral. El procedimiento es el siguiente:



**PASO 1:** Ubicar el espécimen en el cabezal para ensayos de ITS. Colocar el espécimen de tal forma que las bandas de carga estén paralelas y centradas en el plano vertical diametral.

**PASO 2:** Ubicar el plato de transferencia de carga sobre la banda superior y colocar el cabezal de ensayo ensamblado de manera que quede centrado bajo el pistón de carga de la máquina de compresión.

**PASO 3:** Aplicar carga a el espécimen a una razón de avance de 50,8 mm por minuto hasta alcanzar la carga máxima. Registrar la carga máxima P (en kN), con aproximación a 0,1 kN.

**PASO 4:** Inmediatamente después de ensayar el espécimen, romperlo y tomar una muestra de aproximadamente 1.000 g para determinar el contenido de humedad ( $W_{break}$ ). Este contenido de humedad es usado en la **ecuación 16** para determinar la densidad seca del espécimen.

**PASO 5:** Calcule el ITS del espécimen con aproximación a 1 kPa usando la **ecuación 13**:

$$ITS = (2 \times P)(\pi \times h \times d) \times 10000 \quad (13)$$

Donde:

ITS = resistencia a la tracción indirecta [kPa]  
P = carga máxima aplicada [kN]  
h = altura promedio del espécimen [cm]  
d = diámetro del espécimen [cm]

**PASO 6:** Para determinar el ITS saturado, coloque los especímenes bajo agua a  $25 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$  por 24 horas. Sacar los especímenes del agua, secalas superficialmente. Repetir los pasos 1 al 5.

La Tasa de Resistencia Retenida (TSR) es la relación entre el ITS seco y el ITS saturado para un conjunto específico de especímenes, expresada como porcentaje usando la **ecuación 14**:

$$TRS = ITS_{saturado} / ITS_{seco} \times 100 \quad (14)$$

*Determinación de la Resistencia a la Compresión No Confinada:*

El UCS es usado para ensayar especímenes con el contenido de humedad de equilibrio. Se asume que esto representa el contenido de humedad real del pavimento. El UCS es



determinado midiendo la carga última de falla del espécimen de 127 mm de alto y 150 mm de diámetro sujeta a una razón de carga constante de 140 kPa/s (153 kN/min).

El procedimiento es el siguiente:

**PASO 1:** Ubicar el espécimen entre las placas de compresión de la máquina de ensayo. Colocar el espécimen de tal forma que se encuentre centrada en las placas de carga.

**PASO 2:** Aplicar carga al espécimen a una razón de avance de 140 kPa/s hasta alcanzar la carga máxima. Registrar la carga máxima  $P$  (en kN), con aproximación a 0,1 kN.

**PASO 3:** Inmediatamente después de ensayar el espécimen, romperla y tomar una muestra de aproximadamente 1.000 g para determinar el contenido de humedad ( $W_{break}$ ). Este contenido de humedad es usado en la ecuación 16 para determinar la densidad seca del el espécimen.

**PASO 4:** Calcular el UCS del espécimen con aproximación a 1 kPa usando la **ecuación 15:**

$$UCS = (4 \times P) / (\pi \times d^2) \times 10000 \quad (15)$$

Donde:

UCS = resistencia a la compresión no confinada [kPa]  
 $P$  = carga máxima aplicada [kN]  
 $d$  = diámetro del espécimen [cm]

*Determinación de la Densidad Seca:*

Utilizando el contenido de humedad determinado en cada uno de los ensayos descritos anteriormente, calcule la densidad seca usando la ecuación 16:

$$DD = (M_{briq} / VOL) \times (100 / (W_{break} + 100)) \times 1000 \quad (16)$$

Donde:

DD = densidad seca [kg/m<sup>3</sup>]  
 $M_{briq}$  = masa del espécimen curada [g]  
Vol = volumen del espécimen [cm<sup>3</sup>]  
 $W_{break}$  = contenido de humedad del espécimen [%]