

Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)

PROPUESTA: LM-PI-UMP-010-P1

PROCEDIMIENTO DE DISEÑO PARA LA ESTABILIZACIÓN DE BASES CON ASFALTO ESPUMADO

Preparado por:
Unidad de Materiales y Pavimentos

San José, Costa Rica
Abril, 2014

Documento generado con base en el Art. 6, inciso g) de la Ley 8114 y lo señalado en el Cap. IV, Art. 66 Reglamento al Art. 6 de la precitada ley, publicado mediante decreto DE-37016-MOPT.

Preparado por: Unidad de Materiales y Pavimentos del
PITRA-LanammeUCR jose.aguiar@ucr.ac.cr



Información técnica del documento

1. Informe LM-PI-UMP-010-P1		2. Copia No. 1	
3. Título y subtítulo: ESTABILIZACIÓN DE BASE CON ASFALTO ESPUMADO		4. Fecha del Informe Abril, 2014	
7. Organización y dirección 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			
8. Resumen <i>El siguiente documento corresponde a una propuesta de investigación que consiste en la determinación de un procedimiento de diseño de materiales estabilizados con la técnica de asfalto espumado.</i>			
9. Palabras clave Asfalto espumado, materiales estabilizados, diseño		10. Nivel de seguridad: Ninguno	11. Núm. de páginas 32
12. Preparado por: Ing. Fabiola Miranda Argüello Investigador			
Fecha: 15 / 04 / 14			
15. Revisado por: Ing. José Pablo Aguiar Moya, Ph.D. Coordinador Unidad de Materiales y Pavimentos		15. Aprobado por: Ing. Guillermo Loría Salazar, Ph.D. Coordinador General PITRA	
Fecha: 15 / 04 / 14		Fecha: 15 / 04 / 14	Fecha: 15 / 04 / 14

TABLA DE CONTENIDO

1	ASFALTO ESPUMADO.....	7
2	PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE MEZCLAS PARA MATERIALES ESTABILIZADOS.....	7
2.1	MUESTREO Y PREPARACIÓN	7
2.1.1	MUESTREO EN TERRENO.....	8
2.1.2	PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS PARA EL PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE MEZCLAS 8	
2.1.2.1	Ensayos estándar de suelo.....	8
2.1.2.2	Mezclado de la muestra.....	8
2.1.2.3	Proporción representativa.....	9
2.1.3	CANTIDADES DE MUESTRA.....	9
2.1.4	CONTENIDO DE HUMEDAD HIGROSCÓPICO.....	10
2.2	PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE MEZCLAS PARA MATERIALES ESTABILIZADOS CON ASFALTO.....	10
2.2.1	EXIGENCIAS DEL FILLER ACTIVO.....	10
2.2.2	CALIDAD DEL AGUA.....	11
2.2.3	DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE HUMEDAD Y DENSIDAD SECA MÁXIMA	11
2.2.4	PREPARACIÓN DEL MATERIAL ESTABILIZADO CON ASFALTO.....	11
2.2.4.1	Preparación de materiales estabilizados con asfalto espumado.....	11
2.2.4.2	Preparación de muestras para tratamientos con asfalto espumado.....	13
2.2.5	FABRICACIÓN DE PROBETAS DE 100 MM DE DIÁMETRO.....	16
2.2.5.1	Compactación (Método Marshall).....	16
2.2.5.2	Procedimiento de curado.....	17
2.2.5.3	Determinación de la Densidad Bruta.....	17
2.2.6	FABRICACIÓN DE PROBETAS DE 150 MM DE DIÁMETRO.....	18
2.2.6.1	Compactación (Método AASHTO T-180 Modificado).....	18
2.2.6.2	Procedimiento de Curado.....	19
2.2.6.3	Verificación de los contenidos de humedad y de asfalto.....	20
3	DISEÑO DE MEZCLAS PARA MATERIALES ESTABILIZADOS.....	20
3.1	NIVELES DE DISEÑO DE MEZCLA.....	20
3.1.1	NIVEL 1.....	20

3.1.2	NIVEL 2	20
3.1.3	NIVEL 3.....	21
4	ENSAYOS MECÁNICOS.....	21
4.1	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN INDIRECTA (ITS).....	21
4.1.1	DETERMINACIÓN DE LA ITS	21
4.1.2	RIGIDEZ DE MATERIALES ESTABILIZADOS CON ASFALTO ESPUMADO.....	23
4.2	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN INCONFINADA.....	24
4.2.1	DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD SECA	25
4.3	ENSAYO TRIAXIAL	25
4.3.1	FABRICACIÓN DE PROBETAS PARA EL ENSAYO TRIAXIAL.....	25
4.3.2	PROCEDIMIENTO DE ENSAYO TRIAXIAL	26
5	MATERIALES ESTABILIZADOS CON ASFALTO ESPUMADO.....	27
5.1	CLASIFICACIÓN DE MATERIALES ESTABILIZADOS CON ASFALTO.....	27
5.1.1	BSM 1	27
5.1.2	BSM 2	27
5.1.3	BSM 3.....	28
5.2	PROPIEDADES TÍPICAS DE MATERIALES ESTABILIZADOS CON ASFALTO ESPUMADO.....	29
5.3	MATERIAL ADECUADO PARA EL TRATAMIENTO CON ASFALTO ESPUMADO.....	29
5.3.1	CONSIDERACIONES CLIMÁTICAS.....	31
6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de espumación del asfalto	7
Figura 2. Determinación del contenido de agua óptimo para la espumación.....	13
Figura 3. Círculos de mohr coulomb	27
Figura 4. Características de los materiales adecuados para tratamiento con asfalto espumado.....	30

ÍNDICE DE TABLAS

Cuadro 1. Cantidades de muestra requeridas para diferentes ensayos	9
Cuadro 2. Tasas de aplicación recomendadas de filler activo.....	10
Cuadro 3. Resistencia a la tracción indirecta de materiales estabilizados con asfalto espumado.....	23
Cuadro 4. Rangos de módulos resilientes típicos para material estabilizado ensayados en laboratorio.....	23
Cuadro 5. Clasificación de los materiales a partir de los resultados del ensayo its	28
Cuadro 6. Clasificación de los materiales a partir de los resultados del ensayo triaxial.....	28
Cuadro 7. Porcentaje de asfalto espumado aproximado en función de la granulometría	29

1 ASFALTO ESPUMADO

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

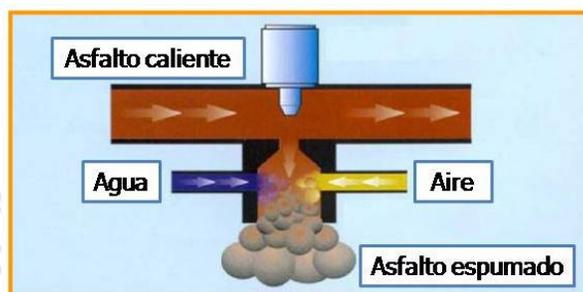


Figura 1. Proceso de espumación del asfalto

2 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE MEZCLAS PARA MATERIALES ESTABILIZADOS

El procedimiento de diseño de mezcla involucra una serie de pasos en función de la importancia de la carretera o del volumen vehicular. Este diseño siempre inicia con las pruebas a las muestras al material que se desea estabilizar, con el fin de determinar el tipo de tratamiento que se requiere aplicar. En caso de que materiales presenten las condiciones para ser estabilizado con asfalto espumado, el objetivo del muestro consiste en la obtención de materiales a los cuales se les ejecutarán diferentes ensayos de laboratorio, que permitan determinar los porcentajes de asfalto y agua a utilizar en campo para obtener un capa espumada adecuada.

2.1 Muestreo y preparación

El método utilizado en la toma de muestras del material que va a ser estabilizado con asfalto espumado es muy importante, puesto que un control inadecuado o deficiente en la toma de muestra se traduce en ensayos no representativos que entregarán resultados erróneos, lo que puede traer serias consecuencias. Por lo tanto, debe tenerse conocimiento de tres factores importantes para la toma de muestras de dosificación:

Propuesta LM-PI-UMP-010-P1	Fecha de emisión: Abril, 2014	Página 7 de 32
----------------------------	-------------------------------	----------------

- 1) Profundidad del reciclado, y las proporciones de cada capa in-situ que será mezclada y conformará la capa compuesta.
- 2) Variabilidad del material en la longitud y profundidad del pavimento existente. Esto significa que deben realizarse suficientes diseños de mezclas como para considerar esta variación. En los casos donde la variabilidad es significativa, el material de cada capa debería ser separado en sus fracciones correspondientes, y luego ser mezclado en las proporciones requeridas. De esta forma, puede obtenerse una mezcla óptima y luego estudiar la influencia de la granulometría en la variabilidad de la mezcla tratada con asfalto espumado.
- 3) Preparación del material del pavimento existente para 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.

2.1.1 Muestreo en terreno

Las muestras son obtenidas durante las investigaciones en terreno y las excavaciones de calicatas. Cada una de las capas superficiales del pavimento (± 300 mm) deben ser muestreadas separadamente, recuperando al menos 150 kg de material de cada capa, el cual probablemente será utilizado en el diseño de mezcla.

2.1.2 Preparación de las muestras para el procedimiento de diseño de mezclas

2.1.2.1 Ensayos estándar de suelo

Determinar la granulometría (ASTM D 422) y el índice de plasticidad (ASTM D4318) del material muestreado de cada capa en forma individual.

2.1.2.2 Mezclado de la muestra

En caso de ser necesario, mezclar el material muestreado de las diferentes capas para obtener una mezcla combinada que sea representativa del material reciclado a profundidad total. Los materiales son mezclados en proporción al espesor de las capas y a la densidad del material in situ. La densidad in situ de los componentes debe ser obtenida cuando los materiales están mezclados. Deben repetirse los ensayos de granulometría y de índice de plasticidad para la muestra mezclada.

2.1.2.3 Proporción representativa

Separar el material en muestras representativas dentro de las siguientes cuatro fracciones:

- 1) Retenido en el tamiz de 19,0 mm.
- 2) Pasando el tamiz de 19,0 mm y retenido en el tamiz de 13,2 mm.
- 3) Pasando el tamiz de 13,2 mm y retenido en el tamiz de 4,75 mm.
- 4) Pasando el tamiz de 4,75.

Reconstruir muestras representativas conforme a la granulometría sobre la porción que pasa el tamiz de 19,0 mm. Sustituir la porción retenida en el tamiz de 19,0 mm con el material que pasa el tamiz de 19,0 mm y retenido en el tamiz de 13,2 mm.

Si el material es insuficiente (por ejemplo, el que pasa el tamiz de 19,0 mm y retenido en el tamiz de 13,2 mm) para sustituir el retenido en el tamiz de 19,0 mm, entonces triturar ligeramente el material retenido en el tamiz de 19,0 mm para proporcionar más material a la fracción deficiente.

2.1.3 *Cantidades de muestra*

En el Cuadro 1 se sugieren cantidades de material requerido para diferentes ensayos.

Cuadro 1. Cantidades de muestra requeridas para diferentes ensayos

Ensayo	Cantidad de muestra requerida
Proctor Modificado, AASHTO T180	5 x 7 kg
Resistencia a la Tracción Indirecta (diámetro 150 mm)	20 kg por contenido estabilizador
Resistencia a la Compresión Inconfinada (diámetro 150 mm)	20 kg por contenido estabilizador
Diseño de Estabilización con asfalto (Probetas Marshall)	Mínimo 10 kg por contenido estabilizador
Contenido de Humedad	Aproximadamente 1 kg

2.1.4 Contenido de humedad Higroscópico

Para determinar el contenido de humedad higroscópico (secado al aire) del material se utilizan dos muestras representativas de 1 kg aproximadamente, secadas al aire. Se requerirán muestras de mayor tamaño cuanto mayor sea el agregado. Las muestras secadas al aire se pesan, con una aproximación a 0,1 g, y luego se colocan en el horno a una temperatura entre 105 °C y 110 °C hasta alcanzar una masa constante. El contenido de humedad higroscópico es la pérdida de masa expresada como un porcentaje de la masa seca de la muestra.

2.2 Procedimiento de diseño de mezclas para materiales estabilizados con asfalto

2.2.1 Exigencias del filler activo

La estabilización con asfalto es realizada normalmente en combinación con una pequeña cantidad de filler activo (cemento o cal hidratada). El cuadro a continuación muestra tasas de aplicación recomendadas en función del material que se desea estabilizar.

Cuadro 2. Tasas de aplicación recomendadas de filler activo

Índice de Plasticidad	Dosificación
> 10	Agregar 1 % de cemento Pórtland
10 - 16	Agregar 1 % de cal hidratada
> 16	Tratar previamente con 2 % de cal hidratada

El tratamiento previo requiere que la cal y el agua sean añadidas al menos 4 horas antes de agregar el asfalto espumado. El material tratado debe ser colocado en un contenedor hermético para conservar la humedad. Sin embargo, debido al proceso de hidratación, siempre se debe verificar el contenido de humedad y, si es necesario, ajustarlo antes de agregar el agente estabilizador asfáltico.

Aunque se recomienda el uso de filler activo, en algunas partes del mundo, estos agentes no se encuentran fácilmente disponibles. En tal caso, puede ser utilizado polvo de trituración (abertura menor a 6 mm) o un material similar. Durante el proceso de diseño de mezcla se realizan ensayos adicionales sin filler activo y/o con polvo de trituración. Los resultados de

estos ensayos permiten tomar una decisión para garantizar la adición de filler activo o polvo de trituración.

2.2.2 *Calidad del agua*

La calidad del agua utilizada para crear el asfalto espumado es importante. Aunque la espuma generada sea aceptable, puede ser que el agua utilizada contenga impurezas. A menudo estas impurezas tienden a acumularse en las paredes de los tubos de alimentación, bloqueando los chorros de inyección de agua y por tanto impiden la formación de las burbujas de asfalto.

2.2.3 *Determinación del contenido óptimo de humedad y densidad seca máxima*

La Norma INVE-785-07 establece que se debe realizar un ensayo modificado de compactación, norma INVE-42 basada en la norma ASTM D1557-00, para obtener el contenido óptimo de humedad del agregado.

Se debe secar la muestra de agregado hasta masa constante a 105°C. En el caso de materiales recuperados de un pavimento existente, la muestra se debe secar a una temperatura menor evitando la adhesión entre partículas, simultáneamente debe determinarse el contenido de asfalto del material a utilizar.

2.2.4 *Preparación del material estabilizado con asfalto*

2.2.4.1 Preparación de materiales estabilizados con asfalto espumado

Las propiedades de espumación de cada tipo de asfalto están caracterizadas por:

Razón de expansión: medida de la viscosidad del asfalto espumado, calculada como la razón entre el máximo volumen de espuma alcanzado y el volumen de asfalto original.

Vida media: medida de estabilidad del asfalto espumado, calculada como el tiempo tomado en segundos en que la espuma decae a la mitad de su volumen máximo.

El objetivo es determinar la temperatura y el porcentaje de agua requerida para producir las mejores propiedades de la espuma (máxima razón de expansión y vida media), para un asfalto en particular. Esto es determinado para tres diferentes temperaturas de asfalto como se describe a continuación:

Propuesta LM-PI-UMP-010-P1	Fecha de emisión: Abril, 2014	Página 11 de 32
----------------------------	-------------------------------	-----------------

- 1) Calentar el asfalto en el recipiente calentador del laboratorio con la bomba circulando asfalto por el sistema, hasta alcanzar la temperatura requerida (normalmente comenzando con 160 °C). Mantener la temperatura requerida durante 5 minutos antes de iniciar las pruebas.
- 2) Calibrar la razón de descarga de asfalto y ajuste el temporizador en el laboratorio para descargar 500 g de asfalto.
- 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).
- 4) Descargar el asfalto espumado dentro de un recipiente de acero precalentado (± 75 °C) durante un tiempo de rocío calculado para 500 g de asfalto. Inmediatamente después que la descarga de espuma se detiene, iniciar a medir el tiempo con un cronómetro.
- 5) Utilizando la varilla de aceite medir la altura máxima alcanzada por el asfalto espumado en el recipiente. Esto es registrado como el volumen máximo.
- 6) Usar el cronómetro para medir el tiempo 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.
- 7) Repetir el procedimiento anterior hasta alcanzar 3 lecturas similares.
- 8) Repetir los pasos del 3 al 7 para un rango de al menos tres razones de asfalto por inyección de agua. Típicamente se usan valores de 2 %, 3 % y 4 % por la masa de asfalto. La norma colombiana INVE-785-07 establece que se requieren cinco muestras de asfalto espumado para producir espuma con contenidos de agua entre 1 a 3 %, con incrementos de 0,5 %.
- 9) Trazar un gráfico de la razón de expansión versus la vida media para las diferentes razones de inyección de agua sobre los mismos ejes (Figura 2). La adición óptima de agua es escogida como un promedio de los dos contenidos de agua requeridos para encontrar criterios mínimos.
- 10) Repetir todo el procedimiento descrito anteriormente para otras dos temperaturas de asfalto (normalmente 170 y 180 °C).

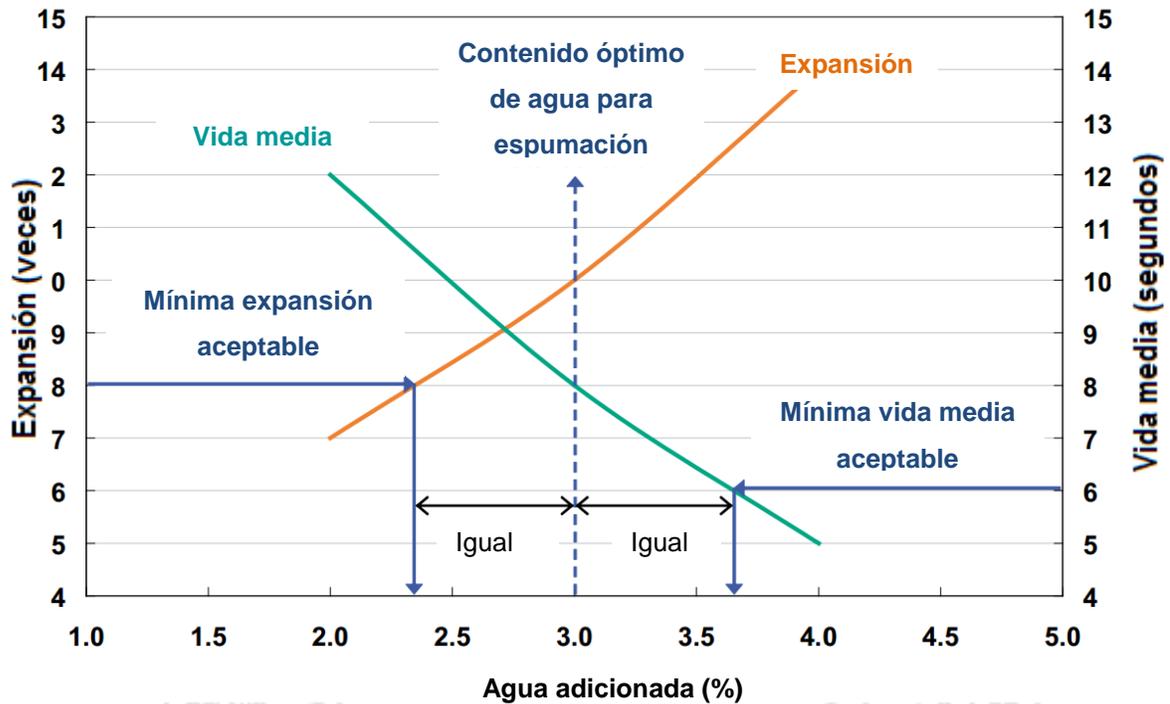


Figura 2. Determinación del contenido de agua óptimo para la espumación

Las propiedades de espumación mínimas aceptables para una estabilización efectiva son:

- Razón de expansión: 8 veces
- Vida media: 6 segundos

Si los requerimientos mínimos no pueden ser alcanzados, el asfalto debe ser rechazado como inadecuado para espumación.

2.2.4.2 Preparación de muestras para tratamientos con asfalto espumado

Para la preparación de muestras para tratamientos con asfalto espumado se debe seguir el procedimiento descrito a continuación:

- 1) Colocar la cantidad de muestra requerida dentro de un contenedor mezclador adecuado. La norma INVE-785-07 establece un tamaño de muestra de 10 kg de agregado en cada porción de mezcla.
- 2) Determinar la masa seca de la muestra a partir de la siguiente ecuación:

$$M_{muestra} = \frac{M_{SA}}{1 + \frac{W_{MSA}}{100}}$$

Donde:

$M_{muestra}$: masa seca de la muestra (g)

M_{SA} : masa seca al aire de la muestra (g)

W_{MSA} : contenido de humedad de la muestra seca al aire (%)

- 3) Determinar el porcentaje requerido de filler activo (cal o cemento) usando la siguiente ecuación:

$$M_{filler} = \frac{C_{add}}{100} \times M_{muestra}$$

Donde:

M_{filler} : masa de cal o cemento requerido (g)

C_{add} : porcentaje de cal o cemento requerido (g)

- 4) Determinar el porcentaje de agua a ser agregada, de manera que el contenido de humedad más el contenido de ligante añadido sean iguales al contenido óptimo de humedad, usando la siguiente ecuación:

$$W_{add} = 1 + (1 + 0,5 W_{OMC} - W_{MSA})$$

Donde:

W_{add} : Agua agregada a la muestra (%)

W_{OMC} : contenido de humedad óptimo (%)

Posteriormente determinar la masa de agua a ser agregada a la muestra empleando la siguiente expresión:

$$M_{agua} = \frac{W_{add}}{100} \times (M_{muestra} + M_{filler})$$

Donde:

M_{agua} : Masa de agua agregada

- 5) Mezclar el material, el filler activo, y el agua en un mezclador hasta que este uniforme. Se debe 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.
- 6) Determinar el asfalto espumado a ser agregado utilizando la ecuación:

$$M_{asfalto} = \frac{B_{add}}{100} \times (M_{muestra} + M_{filler})$$

Donde:

$M_{asfalto}$: masa de asfalto agregado (g)

B_{add} : contenido de asfalto espumado (% Massenanteil)

- 7) Colocar el mezclador mecánico adyacente al laboratorio de espumado de modo que el asfalto espumado pueda ser descargado directamente en el mezclador.
- 8) 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.
- 9) Determinar la cantidad de agua requerida para que la muestra alcance el porcentaje de humedad óptimo a partir de la siguiente expresión:

$$M_{plus} = \frac{(W_{OMC} - W_{muestra})}{100} \times (M_{muestra} + M_{filler})$$

Donde:

Propuesta LM-PI-UMP-010-P1	Fecha de emisión: Abril, 2014	Página 15 de 32
----------------------------	-------------------------------	-----------------

M_{plus} : masa de agua agregada (g)

- 10) Agregar la cantidad de agua adicional y mezclar hasta que el material sea uniforme.
- 11) 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 las probetas siguiendo los procedimientos pertinentes para probetas de 100 mm o 150 mm de diámetro, como se describe en las siguientes secciones.
- 12) Repetir los pasos para un mínimo de cuatro contenidos diferentes de asfalto espumado. La norma INVE-785-07 establece un mínimo de cinco muestras tratadas con diferentes contenidos de asfalto.

2.2.5 Fabricación de probetas de 100 mm de diámetro

El procedimiento para la elaboración de probetas de 100 mm de diámetro de material estabilizado con asfalto espumado se presenta a continuación:

2.2.5.1 Compactación (Método Marshall)

- 1) Preparar el molde y martillo Marshall limpiando el molde, collar, plato base y la cara de compactación del martillo. El equipo de compactación no debe ser previamente calentado, sino mantenerse a temperatura ambiente.
- 2) Pesar material suficiente para alcanzar una altura de compactación de $63.5 \text{ mm} \pm 1.5 \text{ mm}$ (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.
- 3) Compactar la mezcla aplicando 75 golpes con el martillo de compactación. Debe asegurarse que el martillo caiga libremente.
- 4) Retirar el molde y el collar del pedestal, invertir la probeta (dar vuelta). Volver a colocar y presionar firmemente para asegurar que descansa firmemente sobre el plato base. Compactar la otra cara de la probeta aplicando nuevamente 75 golpes.
- 5) Después de la compactación, retirar el molde del plato base y desmoldar la probeta por medio de un extrusor.

La norma INVE-785-07 establece que se deben compactar como mínimo seis probetas por porcentaje de asfalto espumado, tres para ensayo de tracción indirecta con tratamiento previo en seco y tres para ensayo con especímenes saturados previamente a la falla.

2.2.5.2 Procedimiento de curado

Colocar las probetas 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.

La norma INVE-785-07 propone un procedimiento alternativo, el cual consiste en remover el molde de la placa de la base, una vez terminada la compactación y permitir el curado de la probeta compactada dentro del molde durante 24 horas a temperatura ambiente.

2.2.5.3 Determinación de la Densidad Bruta

Después de enfriar cada probeta a temperatura ambiente se debe seguir el siguiente procedimiento:

- 1) Determinar la masa.
- 2) Medir la altura en cuatro sitios uniformemente espaciados alrededor de la circunferencia y calcular la altura promedio.
- 3) Medir el diámetro.
- 4) Calcular la densidad bruta a partir de la siguiente ecuación:

$$Gb_{prob} = (4 \times M_{prob}) (\pi \times d^2 \times h) \times 1000$$

Donde:

Gb : densidad bruta de la probeta (kg/cm^3)

M_{prob} : masa de la probeta (g)

h : altura promedio de la probeta (cm)

d : diámetro de la probeta (cm)

Se debe excluir cualquier probeta cuya densidad bruta difiera del promedio en más de 50 kg/cm^3 , la norma INVE-785-07 admite una tolerancia menor de 30 kg/cm^3 respecto al promedio.

Las probetas de 100 mm de diámetro son ensayadas por resistencia a la tracción indirecta en condiciones seca y saturada. Los resultados de los ensayos de ITS seco y saturado son graficados con respecto al contenido de asfalto respectivo que fue agregado. El contenido óptimo de asfalto es aquel que permite alcanzar mejores propiedades.

2.2.6 Fabricación de probetas de 150 mm de diámetro

Cuando la exigencia de capacidad estructural del pavimento es superior a cinco millones de ESALs, se recomienda realizar ensayos de UCS (Unconfined Compressive Strength) e ITS (Indirect Tensile Strength). A su vez, debido a la cantidad de material requerido para estos ensayos, las probetas son normalmente preparadas sólo con el contenido de asfalto óptimo. 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.

A continuación se plantea el procedimiento para ensayar cuatro probetas de 150 mm de diámetro. Normalmente dos de estas probetas son ensayadas para ITS y dos para UCS. Si se requieren probetas adicionales, se debe aumentar la cantidad de muestra.

2.2.6.1 Compactación (Método AASHTO T-180 Modificado)

- 1) Preparar 24 kg de muestra con el contenido de asfalto óptimo.
- 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.
- 3) Tomar muestras representativas (± 1 kg) de la primera y tercera probeta compactada y secar hasta obtener masa constante. Determinar la humedad de cada probeta usando la siguiente ecuación:

$$W_{prob} = \frac{(M_{húmedo} - M_{seco})}{M_{seco}} \times 100$$

Propuesta LM-PI-UMP-010-P1	Fecha de emisión: Abril, 2014	Página 18 de 32
----------------------------	-------------------------------	-----------------

Donde:

W_{prob} : contenido de humedad de la probeta (%)

$M_{húmedo}$: masa del material húmedo (g)

M_{seco} : masa del material seco (g)

- 4) Compactar al menos cuatro probetas 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 kg con una caída de 457 mm).
- 5) Apartar cuidadosamente el exceso de material de la probeta como se especifica en el método de ensayo AASHTO T-180.
- 6) Remover cuidadosamente las probetas 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 contenido de humedad óptimo (OMC). Con ciertos materiales que carecen de cohesión, puede ser necesario dejar las probetas en el molde durante 24 horas para desarrollar la resistencia antes de extraerlas.

2.2.6.2 Procedimiento de Curado

- 1) Colocar cada probeta en una bolsa plástica sellada (de al menos dos veces el volumen de la probeta) y colocar en horno a 40 °C durante 48 horas.
- 2) Quitar las probetas del horno pasadas las 48 horas y séquelas de sus bolsas plásticas respectivas, asegurando que cualquier humedad en las bolsas no entre en contacto con las probetas. Dejar enfriar a temperatura ambiente.
- 3) Después de enfriar a temperatura ambiente, determinar la masa de cada probeta.
- 4) Calcular la densidad bruta empleando la siguiente ecuación:

$$Gb_{prob} = \left(\frac{M_{prob}}{Vol} \right) \times 1000$$

Donde:

Vol : Volumen de la probeta (cm^3)

Propuesta LM-PI-UMP-010-P1	Fecha de emisión: Abril, 2014	Página 19 de 32
----------------------------	-------------------------------	-----------------

2.2.6.3 Verificación de los contenidos de humedad y de asfalto

- 1) Se toman muestras para verificar los contenidos de agua y de asfalto.
- 2) Se seca cada muestra hasta masa constante a una temperatura entre 105 y 110 °C, para determinar su humedad.
- 3) Posteriormente, se realiza una extracción para determinar el contenido de asfalto.

3 DISEÑO DE MEZCLAS PARA MATERIALES ESTABILIZADOS

3.1 Niveles de diseño de mezcla

3.1.1 Nivel 1

El diseño de mezcla nivel 1 utiliza el ensayo de resistencia a la tensión indirecta en especímenes de 100 mm de diámetro, a partir de las cuales es posible determinar:

- El contenido óptimo de asfalto mediante el ITS seco, ITS húmedo y el índice TSR.
- La necesidad de adicionar filler activo a la mezcla y en qué cantidad mediante el ITS húmedo y el índice TSR.

La clasificación del material empleado para este nivel debe cumplir con un volumen de tránsito de diseño menor a tres millones de ejes estándares equivalentes.

3.1.2 Nivel 2

El diseño de mezcla nivel 2 utiliza el ensayo de resistencia a la tensión indirecta en especímenes de 150 mm de diámetro, a partir de las cuales permiten determinar el contenido de asfalto óptimo con mayor confianza. Este nivel considera los siguientes ensayos:

- Resistencia a la tracción indirecta en condiciones de humedad de equilibrio (ITS equil).
- Resistencia a la tracción indirecta después de la exposición a la humedad (ITS saturado).

Ambos parámetros son considerados en la clasificación de los materiales a partir de los resultados ITS (Cuadro 5).

La clasificación del material empleado para este nivel admite un volumen de tránsito de diseño mayor a tres millones de ejes estándares equivalentes.

3.1.3 Nivel 3

El diseño de mezcla nivel 3 utiliza el ensayo triaxial para evaluar la resistencia al corte de los materiales estabilizados con asfalto.

La clasificación del material empleado para este nivel admite un volumen de tránsito de diseño mayor a seis millones de ejes estándares equivalentes. Por tanto, si se realiza un diseño de la mezcla nivel 3, no es necesario realizar un diseño de mezcla nivel 2.

4 ENSAYOS MECÁNICOS

El diseño de mezcla de materiales estabilizados con asfalto involucra tres niveles de prueba, los cuales dependen del volumen del tránsito de diseño. Los ensayos de resistencia a la tracción indirecta en especímenes secos y saturados se realizan en los niveles 1 y 2. Mientras que para el nivel 3 se recomienda la realización de un ensayo triaxial.

4.1 Resistencia a la Tracción Indirecta (ITS)

La prueba de ITS se utiliza como una medida indirecta de la resistencia a la tracción y flexibilidad de los materiales estabilizados con asfalto, con el fin de obtener las características a flexión del material.

En este ensayo se utilizan especímenes de 100 mm de diámetro para el nivel 1, a partir de los cuales se determina el contenido de asfalto óptimo y si existe la necesidad de adicionar un filler activo y en qué cantidad. Los especímenes de 150 mm son utilizados para refinar el contenido de asfalto óptimo y para proporcionar mayor información en cuanto a la clasificación del material, generalmente se diseñan con el contenido de humedad de equilibrio (ITS equilibrio).

4.1.1 Determinación de la ITS

El ensayo de ITS se utiliza para probar probetas en condiciones secas y saturadas (probetas de 100 mm de diámetro) y contenido de humedad de equilibrio (probetas de 150 mm de diámetro). La resistencia a la tracción indirecta es determinada partir de la medición de la

Propuesta LM-PI-UMP-010-P1	Fecha de emisión: Abril, 2014	Página 21 de 32
----------------------------	-------------------------------	-----------------

carga última de falla de una probeta sometida a una razón de deformación constante de 50,8 mm/min sobre su eje diametral. El procedimiento es el siguiente:

- 1) Colocar la probeta centrada en el plano vertical diametral respecto al cabezal para ensayos de ITS.
- 2) Colocar 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.
- 3) Aplicar carga a la probeta a una razón de deformación de 50,8 mm por minuto hasta alcanzar la carga máxima. Registrar la carga máxima P (en kN), con aproximación a 0,1 kN.
- 4) Inmediatamente después de ensayar la probeta, extraer una muestra de 1 kg aproximadamente para determinar el contenido de humedad ($W_{extraída}$). Este valor es utilizado en el cálculo de la densidad seca de la probeta.
- 5) Calcular la resistencia a la tracción indirecta de la probeta con aproximación a 1 kPa a partir de la siguiente expresión:

$$ITS = \frac{2 \times P}{\pi \times h \times d} \times 1000$$

Donde:

ITS : resistencia a la tracción indirecta (kPa)

P : carga última aplicada (kN)

h : altura promedio de la probeta (cm)

d : diámetro de la probeta (cm)

- 6) Para determinar el ITS saturado, sumergir las probetas en agua a 25 ± 1 °C por 24 horas. Sacar las probetas del agua, secarlas superficialmente y repetir el procedimiento anterior.

El ensayo ITS puede ser realizado en probetas de 100 mm o 150 mm, confeccionadas y curadas siguiendo los procedimientos señalados anteriormente. Además, la susceptibilidad a

la humedad del material es generalmente determinada en términos de la Resistencia a la Tracción Retenida (Tensile Strength Retained, TSR), ensayando probetas de 100 mm mediante la siguiente ecuación:

$$TSR = \frac{ITS_{saturado}}{ITS_{seco}}$$

En el Cuadro 3 se muestran los valores que comúnmente se obtienen del ensayo de resistencia a la tensión indirecta.

El índice TSR es muy útil para identificar problemas en los materiales. Si el valor de TSR es menor al 50% se recomienda la adición de un filler activo. Cuando el material posee, además de un índice de ISR menor al 50%, un valor de ITS seco mayor a 400 kPa, el material contiene un rico alto contenido de arcilla y el asfalto no es efectivo. En este caso se recomienda aplicar un tratamiento al material antes del iniciar con el proceso de estabilización con asfalto.

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

Tipo de material	Probetas 100 mm Marshall		Probetas 150 mm Próctor
	ITS_{seco} (kPa)	$TSR_{razón}$	ITS_{equ} (kPa)
RAP/piedra chancada (50/50)	250 a 600	0,8 a 1,0	120 a 250
Piedra chancada graduada	200 a 500	0,6 a 0,9	120 a 200
Grava natural (IP<10 y CBR <30)	150 a 450	0,3 a 0,75	80 a 150

4.1.2 Rigidez de materiales estabilizados con asfalto espumado

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 de probetas Marshall de 100 mm de diámetro (curadas y secas) a tracción indirecta a 10 Hz y 25°C, evalúa los valores presentados en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Rangos de módulos resilientes típicos para material estabilizado ensayados en laboratorio

Propuesta LM-PI-UMP-010-P1	Fecha de emisión: Abril, 2014	Página 23 de 32
----------------------------	-------------------------------	-----------------

Tipo de material	MR (MPa)
RAP/piedra chancada (50/50)	2500 a 4000
Piedra chancada graduada	2000 a 3000
Grava natural (IP<10 y CBR <30)	1500 a 3000

4.2 Resistencia a la compresión inconfiada

Investigaciones recientes han introducido la Resistencia a la Compresión no Confinada (UCS) como un 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 UCS de 700 kPa para una probeta de 150 mm de diámetro, confeccionada con un esfuerzo de compactación del 100% del Proctor Modificado.

El UCS se obtiene a partir de la medición de la carga última de falla de una probeta de 127 mm de alto y 150 mm de diámetro sujeta a una razón de carga constante de 140 kPa/s (153 kN/min). Este procedimiento se emplea en probetas con el contenido de humedad de equilibrio, asumiendo que esto representa el contenido de humedad real del pavimento. El procedimiento se describe a continuación:

- 1) Colocar la probeta centrada entre las placas de compresión de la máquina de ensayo.
- 2) Aplicar carga a la probeta a una razón de carga de 140 kPa/s hasta alcanzar la carga máxima.
- 3) Registrar la carga máxima P (en kN), con aproximación a 0,1 kN.
- 4) Inmediatamente después de ensayar la probeta, extraer una muestra de 1 kg aproximadamente para determinar el contenido de humedad ($W_{extraída}$). Este valor es utilizado en el cálculo de la densidad seca de la probeta.
- 5) Calcular el UCS de la probeta con aproximación a 1 kPa a partir de la siguiente expresión:

$$UCS = \frac{4 \times P}{\pi \times d^2} \times 10000$$

Donde:

$UCS =$ resistencia a la compresión inconfiada (kPa)

P : carga máxima aplicada (kN)

d : diámetro de la probeta (cm)

4.2.1 Determinación de la densidad seca

A partir del contenido de humedad determinado en los ensayos de ITS y UCS es posible obtener la densidad seca empleando la siguiente ecuación:

$$GS = \frac{M_{prob}}{Vol} \times \frac{100}{W_{extra\ ida} + 100} \times 1000$$

Donde:

GS : densidad seca (kg/cm^3)

M_{prob} : masa de la probeta (g)

Vol : volumen de la probeta (cm^3)

$W_{extra\ ida}$: contenido de humedad de la probeta del ensayo de ITS o UCS (%)

4.3 Ensayo Triaxial

El ensayo triaxial permite para determinar la cohesión y el ángulo de fricción interna de un material estabilizado con asfalto. Generalmente sólo se realiza con el contenido óptimo de asfalto, pero se pueden utilizar contenidos de asfalto adicionales para investigar la susceptibilidad de los parámetros de corte.

4.3.1 Fabricación de probetas para el ensayo triaxial

- 1) Preparar cuatro probetas con emulsión asfáltica (aproximadamente 45 kg de muestra), con el contenido óptimo de asfalto. Incluir algo de filler activo.
- 2) Cuando se requiera, añadir la cantidad de agua suficiente para lograr que la muestra alcance el contenido de humedad óptima de compactación y mezclar hasta que esté uniforme. Colocar el material en un contenedor hermético.

Propuesta LM-PI-UMP-010-P1	Fecha de emisión: Abril, 2014	Página 25 de 32
----------------------------	-------------------------------	-----------------

- 3) Tomar muestras representativas (± 1 kg) de cada probeta para determinar la humedad de la probeta.
- 4) Compactar al menos cuatro probetas usando un molde de 150 mm de diámetro con una altura interna efectiva de 250 mm, aplicando el esfuerzo de compactación AASHTO T-180 modificado (10 capas de 25 mm de espesor aproximadamente, 55 golpes por capa usando un martillo de 4,536 kilogramos con una caída de 457 mm).
- 5) Apartar cuidadosamente el exceso de material de la probeta como se especifica en el método de ensayo AASHTO T-180, determinar la masa de la probeta y calcular la densidad bruta.
- 6) Seguir el procedimiento de curado especificado para probetas de 150 mm de diámetro.

4.3.2 Procedimiento de ensayo triaxial

El siguiente procedimiento es tomado del Protocolo de Prueba para ensayos triaxiales en la Universidad de Stellenbosch en Sudáfrica.

- 1) Las probetas son cubiertas con dos membranas de látex para asegurar que no ocurran fugas de aire, evitando alteraciones en los resultados del ensayo.
- 2) Las membranas son selladas en la parte superior e inferior de la probeta con un anillo de goma sobre el plato base y el plato de carga, y es colocada en la celda de carga.
- 3) Se aplica la tensión de confinamiento bombeando aire en la celda hasta alcanzar la presión deseada.
- 4) El ensayo se realiza en modo de desplazamiento controlado con una razón de desplazamiento de 6,25 mm por minuto. La muestra es ensayada hasta la rotura, se registra la carga máxima y la presión de confinamiento.
- 5) Inmediatamente después de ensayar la probeta, extraer una muestra del interior de la probeta de 1,0 kg aproximadamente para determinar el contenido de humedad (W extraída). Este contenido de humedad es usado en la ecuación A2.19 para determinar la densidad seca de la probeta.

Todos los ensayos de triaxiales son realizados a 25 °C. Se debe repetir los pasos 1 al 5 para todas las probetas a ser ensayadas a diferentes presiones de confinamiento y finalmente se

dibuja la envolvente de rotura de Mohr-Coulomb y se determina la cohesión y el ángulo de fricción interna (Figura 3).

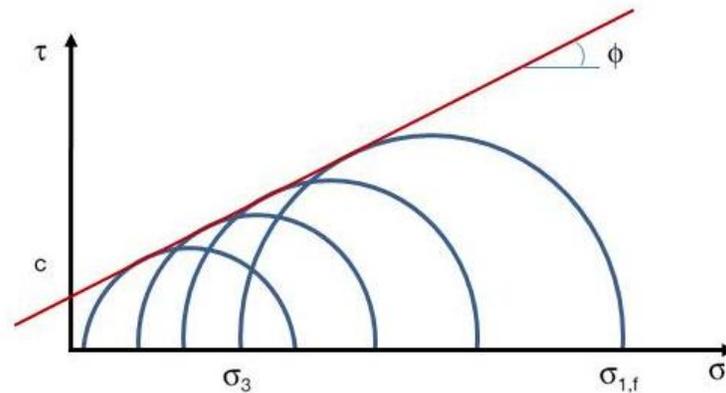


Figura 3. Círculos de Mohr Coulomb

5 MATERIALES ESTABILIZADOS CON ASFALTO ESPUMADO

5.1 Clasificación de materiales estabilizados con asfalto

Según la Guía Técnica del 2009 de la Academia de Asfalto, las clasificaciones de materiales estabilizados con asfalto (BMS, por sus siglas en inglés) contempla tres clases de materiales, los cuales se mencionan a continuación:

5.1.1 BSM 1

Este material posee una alta resistencia al corte, y se utiliza típicamente como una capa de base para niveles de tránsito de más de seis millones de ejes estándares equivalentes. Generalmente la fuente de esta clase de material corresponde a piedra bien graduada o pavimento asfáltico reciclado (RAP).

5.1.2 BSM 2

Este material posee una resistencia al corte de moderada, y se utiliza típicamente como una capa de base para niveles de tránsito de menos de seis millones de ejes estándares equivalentes. Generalmente la fuente de esta clase de material corresponde a grava natural clasificada o pavimento asfáltico reciclado (RAP).

5.1.3 BSM 3

Este material es típicamente un suelo de grava y/o una arena, estabilizadas con un contenido asfáltico mayor. Si se desea utilizar como capa de base, esta clase de material se recomienda únicamente para niveles de tránsito menores a un millón de ejes estándares equivalentes.

A partir de los ensayos de ITS y Triaxial descritos anteriormente, es posible clasificar el material estabilizado con asfalto espumado. Los cuadros a continuación permiten realizar dicha clasificación en las tres clases mencionadas.

Cuadro 5. Clasificación de los materiales a partir de los resultados del ensayo ITS

Prueba	Diámetro del espécimen	BMS 1	BMS 2	BMS 3	Propósito
ITS seco	100 mm	> 225	175 a 225	125 a 175	Indica el contenido de asfalto óptimo
ITS húmedo	100 mm	> 100	75 a 100	50 a 75	Indica la necesidad de adicionar filler activo
ITS equilibrio	150 mm	> 175	135 a 175	95 a 135	Optimiza el contenido de asfalto óptimo
ITS saturado	150 mm	> 150	100 a 150	60 a 100	Verifica el valor de ITS húmedo

Cuadro 6. Clasificación de los materiales a partir de los resultados del ensayo triaxial

Parámetro	BMS 1	BMS 2	BMS 3
Cohesión	> 250	100 a 250	50 a 100
Ángulo de fricción	> 40	30 a 40	< 30
Cohesión retenida	> 75	60 a 75	50 a 60

5.2 Propiedades típicas de materiales estabilizados con asfalto espumado

Las propiedades que se describen a continuación se obtienen cuando la aplicación del asfalto espumado es óptima, de acuerdo al procedimiento de diseño de mezcla indicado anteriormente. Los rangos de aplicación de asfalto espumado sugeridos en la siguiente tabla son útiles para definir un contenido de asfalto 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.

Cuadro 7. Porcentaje de asfalto espumado aproximado en función de la granulometría

Porcentaje que pasa la malla		Porcentaje de asfalto espumado (% en peso sobre el agregado seco)
4,75 mm	0,075 mm	
< 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
	> 10,0	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
	> 10,0	3,5 a 4,5

Los contenidos de asfalto espumado presentados en el cuadro son solo indicadores aproximados. El contenido óptimo de asfalto está definido por otras variables además de la granulometría del agregado, y por lo tanto es necesario realizar el correspondiente diseño de mezcla. 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".

5.3 Material adecuado para el tratamiento con asfalto espumado

La tecnología de asfalto espumado es aplicable en la estabilización de una gran variedad de materiales. Se han utilizado en forma satisfactoria para el proceso de reciclado tanto materiales granulares seleccionados como marginales, vírgenes o reciclados. Sin embargo, es importante establecer los límites de tolerancia requerida en los agregados, así como

Propuesta LM-PI-UMP-010-P1	Fecha de emisión: Abril, 2014	Página 29 de 32
----------------------------	-------------------------------	-----------------

identificar la composición óptima del material que va a ser sometido al tratamiento con asfalto espumado.

Los materiales que son pobres en finos no se mezclan en forma adecuada con el asfalto espumado, por tanto se requiere un porcentaje mínimo de finos del 5% (Figura 4), considerando como finos la fracción que atraviesa la malla de 0,075 mm (No. 200). Menores porcentajes de finos ocasionan una dispersión deficiente y tienden a formar "filamentos" de asfalto (término utilizado en materiales reciclados correspondiente a las aglomeraciones del material fino con el asfalto), los cuales varían en tamaño en función de la escasez de finos. Un porcentaje de finos muy bajo producirá largos filamentos, los que en la mezcla actuarán como lubricante y producirán una disminución en la resistencia y estabilidad del material.

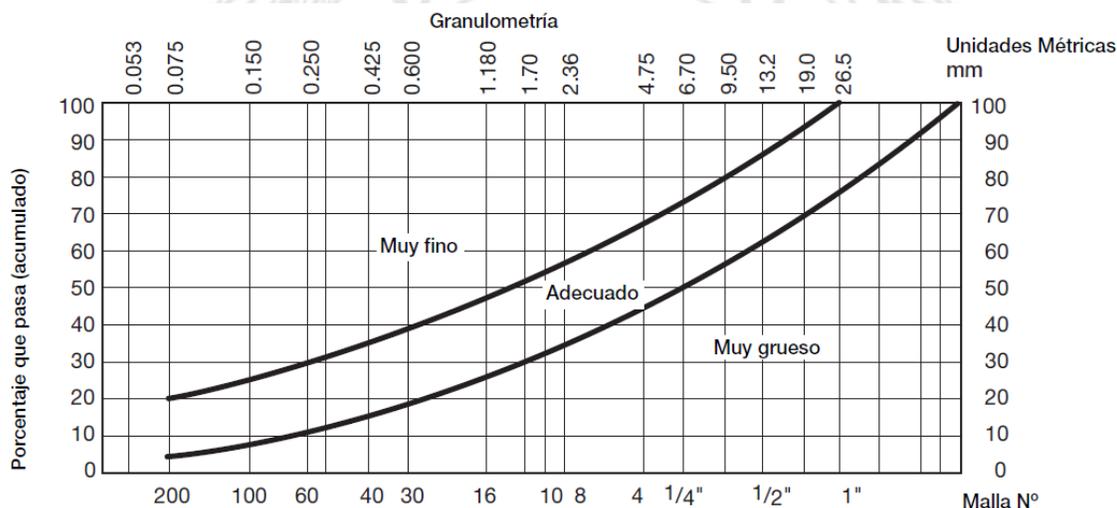


Figura 4. Características de los materiales adecuados para tratamiento con asfalto espumado

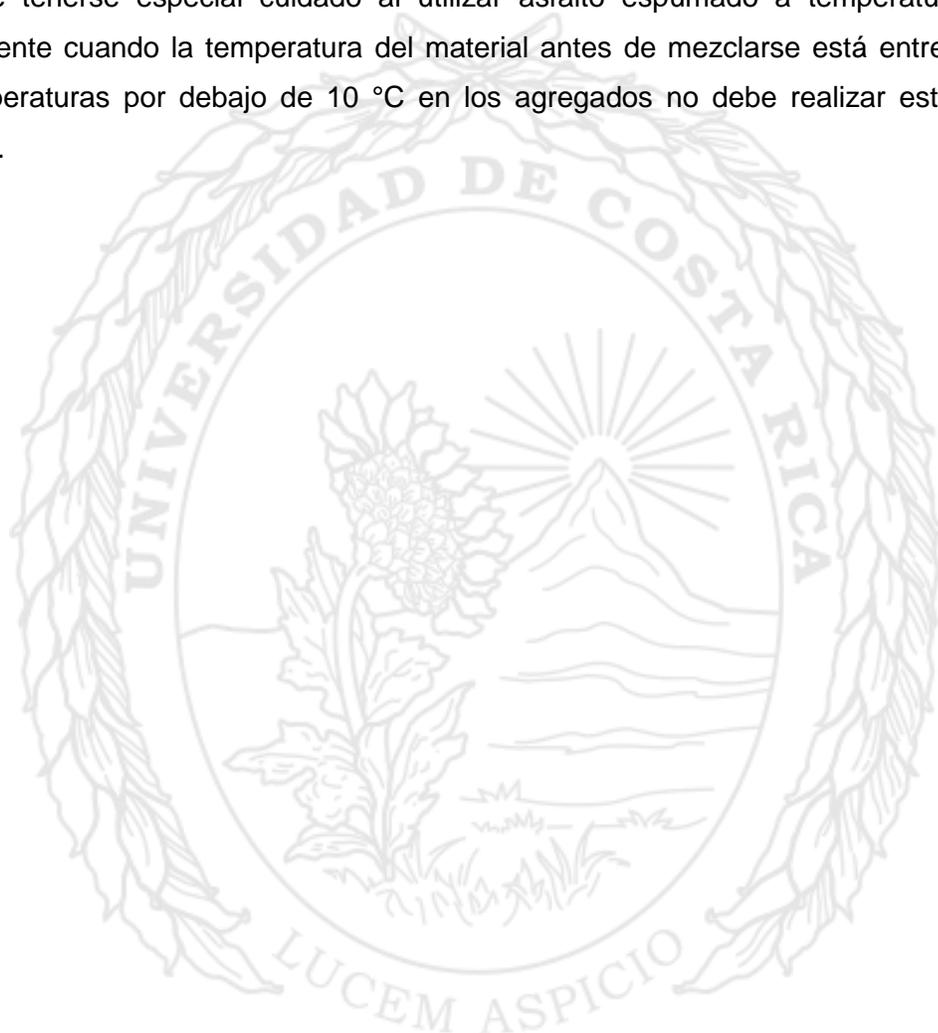
El material que es deficiente en finos puede ser mejorado mediante la adición de cemento, cal u otro material que pase en un 100% la malla No 200. Sin embargo, debe evitarse una dosificación de cemento superior al 1,5%. Un porcentaje mayor de cemento tiene un efecto negativo, producto de la pérdida de flexibilidad en la capa estabilizada.

Es importante obtener una granulometría continua en el tamaño 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.

5.3.1 Consideraciones climáticas

La temperatura afecta el proceso de espumación. Si la temperatura del agregado es demasiado baja, el asfalto espumado no será dispersado correctamente en la mezcla. Por tanto, debe tenerse especial cuidado al utilizar asfalto espumado a temperaturas frías, particularmente cuando la temperatura del material antes de mezclarse está entre 10 y 15 °C. A temperaturas por debajo de 10 °C en los agregados no debe realizar este tipo de tratamiento.



6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Asphalt Academy (2009). Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials. Segunda Edición. Mayo 2009. ISBN 978-0-7988-5582-2
- Norma INVE-785-77. DISEÑO DE MEZCLAS DE AGREGADOS CON CEMENTO ASFÁLTICO ESPUMADO. Colombia.
- Wirtgen GmbH (2004). Manual de Reciclado en Frío. Segunda Edición. Noviembre 2004. ISBN 3-936215-08-1
- Wirtgen GmbH (2012). Wirtgen Cold Recycling Technology. Primera Edición. Alemania.

