



**UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA**



**LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES**

Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)

Informe: LM-PI-UMP-051-R1

RECOMENDACIONES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENSAYOS EN MATERIALES ESTABILIZADOS CON ASFALTO ESPUMADO

Preparado por:
Unidad de Materiales y Pavimentos

San José, Costa Rica
Febrero, 2016

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-051-R1		2. Copia No. 1
3. Título y subtítulo: RECOMENDACIONES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENSAYOS EN MATERIALES ESTABILIZADOS CON ASFALTO ESPUMADO		4. Fecha del Informe Febrero, 2016
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. Notas complementarias		
9. Resumen <i>Este documento busca presentar información de importancia en el diseño de la estabilización de materiales granulares, material reciclado o una combinación de ambos, mediante la utilización de asfalto espumado como un agente estabilizador, dentro de la cual se especifican parámetros como el contenido de humedad óptimo, las características de plasticidad y de distribución granulométrica recomendables para su aplicación y la escogencia de ciertos rellenos minerales como un aporte de resistencia al material. Finalmente, los requerimientos de resistencias para los materiales previos a estabilizar según las condiciones de tráfico, geometría de la vía y clima; y de esta forma definir si una ruta es viable o no aplicar esta técnica.</i>		
10. Palabras clave Asfalto espumado, bases estabilizadas, contenido óptimo de humedad, contenido óptimo de asfalto, razón de expansión, vida media, RAP, filler, reciclado en frío	11. Nivel de seguridad: Ninguno	12. Núm. de páginas 51
13. Preparado por:		
Ing. Andrea Ulloa Calderón Investigadora Unidad de Materiales y Pavimentos 	Ing. Fabricio Leiva Villacorta, Ph.D. Investigadora Unidad de Materiales y Pavimentos 	Ing. Tania Ávila Esquivel Investigadora Unidad de Materiales y Pavimentos 
Fecha: 08 / 03 / 16	Fecha: 08 / 03 / 16	Fecha: 08 / 03 / 16
14. Revisado por:		
Ing. José Pablo Aguiar Moya, Ph.D. Coordinador Unidad de Materiales y Pavimentos 	Ing. Fabián Elizondo Arrieta SubCoordinador PITRA 	15. Aprobado por: Ing. Guillermo Loria Salazar, Ph.D. Coordinador General PITRA 
Fecha: 08 / 03 / 16	Fecha: 08 / 03 / 16	Fecha: 08 / 03 / 16



TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	5
ÍNDICE DE TABLAS	5
1 INTRODUCCIÓN.....	7
2 MANTENIMIENTO Y REHABILITACIÓN DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTOS	7
2.1 MATERIALES PARA REHABILITACIÓN DE PAVIMENTOS.....	10
2.1.1 <i>INVESTIGACIÓN PRELIMINAR</i>	12
2.1.2 <i>INVESTIGACIÓN DETALLADA</i>	12
2.1.3 <i>DISEÑO PRELIMINAR DE REHABILITACIÓN</i>	13
2.1.4 <i>DISEÑO DE MEZCLA EN LABORATORIO PARA MATERIALES RECICLADOS</i>	14
2.1.5 <i>CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES RECUPERADOS</i>	15
2.1.6 <i>PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE MEZCLA</i>	16
2.1.7 <i>AGENTES ESTABILIZADORES</i>	19
2.1.8 <i>ASFALTO ESPUMADO</i>	20
2.1.9 <i>FILLER</i>	23
2.2 PROPIEDADES ESPERADAS DE LOS MATERIALES CANDIDATOS A SER ESTABILIZADOS CON ASFALTO ESPUMADO	24
3 ENSAYOS DE LABORATORIO PARA DISEÑO DE MATERIAL ESTABILIZADO CON ASFALTO ESPUMADO	28
3.1 MUESTREO Y PREPARACIÓN.....	28
3.1.1 <i>MUESTREO EN CAMPO</i>	28
3.1.2 <i>PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS PARA EL PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE MEZCLAS</i> .	29
3.1.2.1 <i>Ensayos estándar de suelo</i>	29
3.1.2.2 <i>Mezclado de la muestra</i>	29
3.1.2.3 <i>Proporción representativa</i>	29
3.1.3 <i>CONTENIDO DE HUMEDAD HIGROSCÓPICO</i>	30
3.2 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE MEZCLAS PARA MATERIALES ESTABILIZADOS CON ASFALTO ESPUMADO	31
3.2.1 <i>CONTENIDO DE ASFALTO ESPUMADO</i>	31
3.2.2 <i>EXIGENCIAS DEL FILLER ACTIVO</i>	34
3.2.3 <i>CALIDAD DEL AGUA</i>	35
3.2.4 <i>DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE HUMEDAD Y DENSIDAD SECA MÁXIMA</i>	35
3.2.5 <i>PREPARACIÓN DEL MATERIAL ESTABILIZADO CON ASFALTO ESPUMADO</i>	36
3.2.5.1 <i>Preparación de materiales estabilizados con asfalto espumado</i>	36
3.2.5.2 <i>Preparación de muestras para tratamientos con asfalto espumado</i>	38



3.2.6	FABRICACIÓN DE PROBETAS DE 100 MM DE DIÁMETRO	41
3.2.6.1	Compactación (Método Marshall)	41
3.2.6.2	Procedimiento de curado	42
3.2.6.3	Determinación de la Densidad Bruta	42
4	NIVELES DE DISEÑO DE MEZCLA	43
4.1	NIVEL 1	43
4.2	NIVEL 2	43
4.3	NIVEL 3	44
5	ENSAYOS MECÁNICOS	44
5.1	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN INDIRECTA (ITS)	44
5.1.1	DETERMINACIÓN DE LA ITS	45
5.1.2	DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD SECA	47
5.1.3	RIGIDEZ DE MATERIALES ESTABILIZADOS CON ASFALTO ESPUMADO	47
6	MATERIALES ESTABILIZADOS CON ASFALTO ESPUMADO	48
6.1	CLASIFICACIÓN DE MATERIALES ESTABILIZADOS CON ASFALTO ESPUMADO	48
6.2	PROPIEDADES TÍPICAS DE MATERIALES ESTABILIZADOS CON ASFALTO ESPUMADO	48
6.3	CONSIDERACIONES CLIMÁTICAS	49
7	COMENTARIOS FINALES	50
7.1	UNIFORMIDAD DEL MEZCLADO IN-SITU	50
7.2	CANTIDADES ÓPTIMAS	50
7.3	CONDICIONES PREVIAS A LA HABILITACIÓN DEL TRÁFICO	50
8	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50



ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. CATEGORÍAS DE RECICLADO.....	10
FIGURA 2. PASOS PARA LA ELABORACIÓN DE PROYECTOS DE REHABILITACIÓN. ..	11
FIGURA 3. ANÁLISIS DE DEFLEXIONES A PARTIR DEL ENSAYO DE DEFLECTOMETRÍA (FWD).	13
FIGURA 4. ÍNDICE DE SELECCIÓN PARA LA ESTABILIZACIÓN DE MATERIALES GRANULARES.	15
FIGURA 5. NIVELES DE DISEÑO.	17
FIGURA 6. CURVA GRANULOMÉTRICA.....	18
FIGURA 7. PRODUCCIÓN DE ASFALTO ESPUMADO.....	21
FIGURA 8. CARACTERÍSTICAS DEL ASFALTO ESPUMADO.	22
FIGURA 9. RELACIÓN ENTRE PROPIEDADES DEL ASFALTO ESPUMADO.....	23
FIGURA 10. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES ADECUADOS PARA TRATAMIENTO CON ASFALTO ESPUMADO.	25
FIGURA 11. ENSAYO DE RESISTENCIA RETENIDA A LA TENSIÓN DIAMETRAL.....	26
FIGURA 12. GRÁFICOS DE DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA MEDIANTE EL MÉTODO MARSHALL.	33
FIGURA 13. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA ÓPTIMO PARA LA ESPUMACIÓN.....	37

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.GRADACIÓN PARA MATERIAL ESTABILIZADO CON ASFALTO ESPUMADO (AASHTO T 27, T11)	19
TABLA 2. ESPECIFICACIONES RECOMENDADAS DE LOS MATERIALES A ESTABILIZAR CON ASFALTO ESPUMADO.....	25
TABLA 3. INDICADORES PARA CLASIFICACIÓN DE MEB PARA MATERIAL A ESTABILIZAR.....	27
TABLA 4. ESTIMACIÓN DE LA CANTIDAD DE ASFALTO ESPUMADO	31
TABLA 5. CANTIDADES DE MUESTRA REQUERIDAS PARA DIFERENTES ENSAYOS ..	33



TABLA 6. RESUMEN DE RESULTADOS DE DISEÑO DE BASE ESTABILIZADA CON ASFALTO ESPUMADO PARA ESPECÍMENES COMPACTADOS MEDIANTE EL MÉTODO MARSHALL	34
TABLA 7. ESPECIFICACIÓN RECOMENDADA DE USO DE FILLER ACTIVO	34
TABLA 8. RESISTENCIA A LA TRACCIÓN INDIRECTA DE MATERIALES ESTABILIZADOS CON ASFALTO ESPUMADO	47
TABLA 9. RANGOS DE MÓDULOS RESILIENTES TÍPICOS PARA MATERIAL ESTABILIZADO ENSAYADOS EN LABORATORIO.....	48
TABLA 10. CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES A PARTIR DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO ITS	48



1 INTRODUCCIÓN

Las técnicas de preservación forman parte de convenios y programas establecidos para la conservación vial del país; las cuales mediante actividades destinadas a preservar de forma continua y sostenida, buscan mantener el buen estado de las vías a través del tiempo, donde esto significa que las condiciones de operación, tanto funcionales como estructurales sean garantizadas de manera óptima.

La escogencia del tipo de técnica en un camino que requiere ser intervenido para mejorar sus características estructurales, es compleja y conlleva un proceso de toma de decisiones por parte de la Administración, contratistas y en ocasiones inclusive con la comunidad. Por ello es de suma importancia recopilar toda la información necesaria para obtener un correcto desarrollo de todas las etapas que involucra la selección de la o las técnicas que se utilizarán en una ruta.

En este documento, se estudia el uso del asfalto espumado (un material innovador en el país), como un agente estabilizador para el mejoramiento de pavimentos que presentan un deterioro considerable en capas de rueda asfálticas, o en la conformación de capas de base granular estabilizadas que provean una mayor resistencia a la estructura del pavimento.

2 MANTENIMIENTO Y REHABILITACIÓN DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTOS

Existen diferentes opciones para la rehabilitación, mejoramiento y preservación de pavimentos, y para cada opción es necesario considerar como punto de partida la caracterización de los materiales existentes, con el fin de definir cuáles serán los que se remplazarán parcial o en su totalidad, de manera que se obtenga como resultado una estructura del pavimento durable y resistente ante las condiciones de tráfico y clima del lugar.

La mayoría de acciones para el mantenimiento de pavimentos son regularmente enfocadas en evacuar el agua de la estructura, de modo que la superficie se mantenga impermeable y



que los drenajes funcionen efectivamente. Otra solución suele ser el sellado de grietas mediante riegos de emulsión, este proceso evita la permanencia del agua en la superficie y que esta penetre posteriormente a las capas inferiores.

Estas medidas únicamente proveen una respuesta ante el deterioro producido por el medio ambiente. La deformación y grietas de fatiga causadas por las cargas de tráfico no pueden ser tratadas en forma efectiva con acciones de mantenimiento superficial sino que requieren alguna forma de rehabilitación.

La decisión oportuna de cuándo intervenir un pavimento deteriorado y si requiere un mantenimiento, mejora o rehabilitación, sólo es posible si se cuenta con un Sistema de Administración de Pavimentos, con el cual se tenga suficiente información del estado de la estructura del pavimento en el tiempo. De lo contrario, se opta por soluciones que resultan en mejoras a corto plazo y generalmente se posterga la intervención adecuada por un asunto de costo-efectividad.

En cuanto a la rehabilitación existen dos tipos, los cuales se describen a continuación:

- a. **Rehabilitación menor:** Este tipo de estrategias sugieren intervenciones que permitan recuperar la capacidad estructural en niveles intermedios así como la capacidad funcional en niveles críticos. Debido a que la capacidad estructural remanente es aún entre 20 – 60% las labores pueden circunscribirse a intervenciones a nivel de la superficie de rueda. Un perfilado y la colocación de una nueva sobrecapa con un aporte estructural significativo, de acuerdo con un diseño estructural que tome en consideración la capacidad estructural remanente de la sección existente, así como un nuevo periodo de diseño, puede ser un ejemplo de este tipo de estrategia de intervención.
- b. **Rehabilitación mayor:** En este caso es necesario realizar una importante recuperación de la capacidad estructural por lo que el tipo de intervención debería abarcar labores a nivel de la capa de base existente. Labores de sustitución o estabilización de la base existente en combinación con la colocación de nuevas



sobrecapas con periodos de diseño apropiados son ejemplo de este tipo de estrategia de intervención. Se podrían realizar labores de sustitución de la base o su estabilización, en combinación con la colocación de una nueva capa asfáltica cuyos espesores provean el aporte estructural requerido, de acuerdo con los estudios técnicos que se deben realizar al respecto, mismos que deberán considerar la capacidad remanente de la sección existente, así como el nuevo periodo de diseño. En el caso de pavimento rígido, las labores de rehabilitación mayor comprenden la sustitución de la losa existente. En el caso de las rehabilitaciones es recomendable una auscultación previa de los espesores existentes para posteriormente justificar la demolición parcial requerida, con el objeto de ajustar la capacidad estructural y la calidad de ruedo, de acuerdo con las solicitudes de carga actuales, de manera que estas intervenciones garanticen el peralte transversal requerido y acorde con el diseño geométrico.

En aquellas situaciones en las que se precise realizar una rehabilitación estructural en el pavimento mediante alguna de las opciones citadas anteriormente, la escogencia de los materiales dependerá primordialmente de las características existentes del pavimento a rehabilitar, de las cargas y de las condiciones climáticas esperadas en el sitio.

Tanto para mantenimiento como para rehabilitación de pavimentos, el reciclado en frío resulta una técnica viable en muchos de los proyectos, pues es un proceso que favorece muchos aspectos constructivos, económicos, pero principalmente ambientales. El reciclado en frío se puede clasificar según dos categorías; ya sea si el material reciclado es tratado con un agente estabilizador o no.

Ahora bien, dentro de las dos categorías se destacan otras sub-clasificaciones: cuando se utiliza el 100% del material reciclado o recuperado (RAP), cuando se estabiliza material granular y/o RAP, la modificación mecánica del material antes del reciclado y finalmente la pulverización de capas asfálticas de gran espesor; tal como se muestra en la Figura 1.

2.1 Materiales para rehabilitación de pavimentos

Dentro de los beneficios que se obtienen al utilizar reciclado en frío es el hecho de que se puede reutilizar parcial o hasta el 100% de los materiales existentes, disminuyendo el volumen de material nuevo que debe importarse desde las fuentes de material como tajos o ríos. Esto reduce los efectos sobre el medio ambiente, no sólo por la disminución en el uso de material virgen, sino también porque se aminoran los gases emitidos en el transporte y en la producción de material desde la fuente hasta el sitio de construcción.

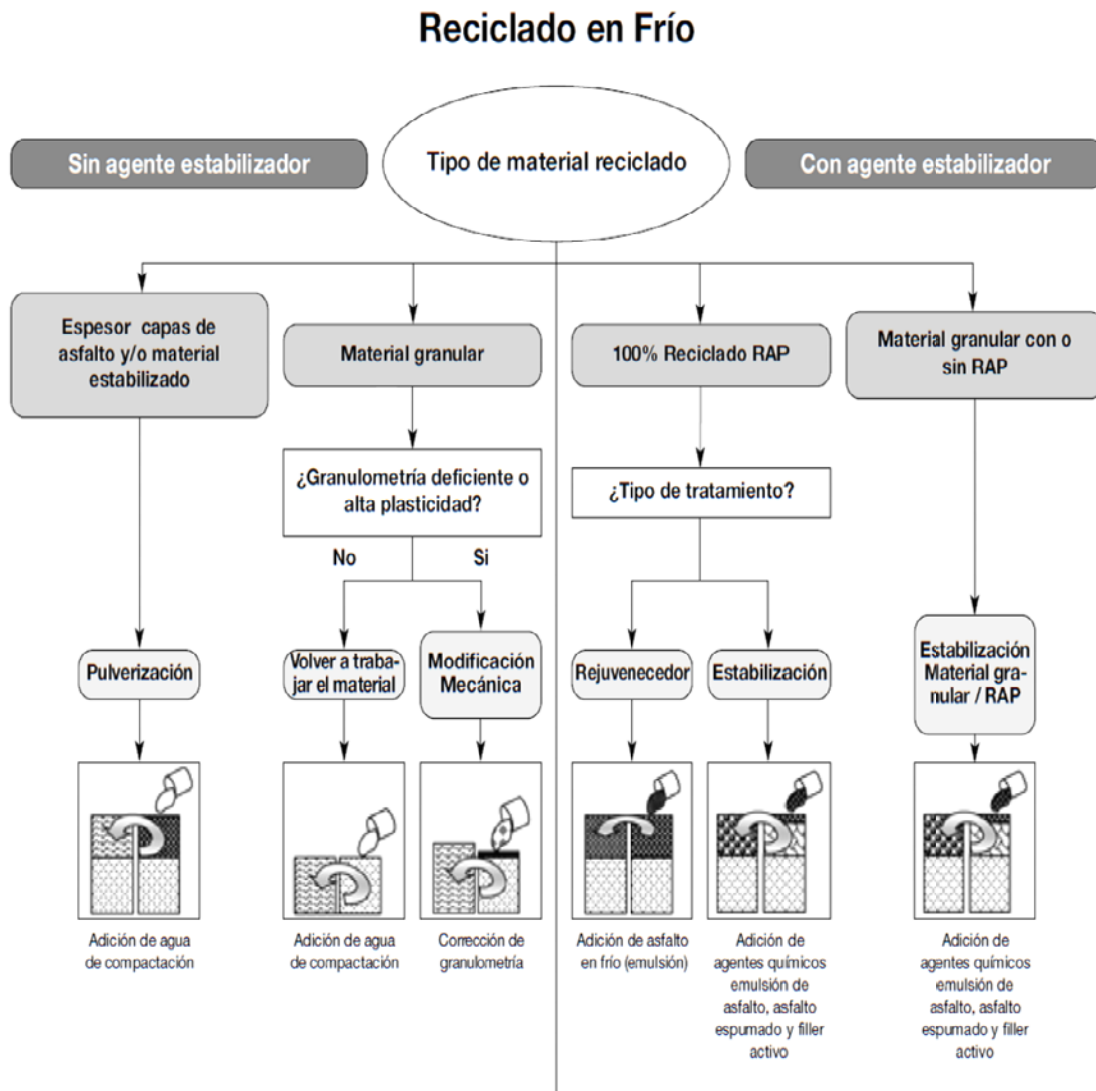


Figura 1. Categorías de reciclado.
Fuente: Wirtgen (2004)



La calidad de las capas recicladas dependerá en gran medida de la escogencia de los materiales que previamente fueron definidos en el diseño. En el proceso de diseño de toda intervención es indispensable disponer de un inventario de deterioros, un estudio preliminar y una investigación detallada para la toma de decisiones previas al inicio de las obras. Los pasos a seguir en este proceso hasta la ejecución de las obras se esquematiza en la Figura 2.



Figura 2. Pasos para la elaboración de proyectos de rehabilitación.



2.1.1 Investigación preliminar

Dado que la mayoría de caminos que actualmente se encuentran pavimentados en el país presentan secciones estructurales cambiantes en pocos kilómetros o en ocasiones en metros, es aún más relevante la recolección de información a través de suficientes extracciones de material para su análisis en laboratorio, así como la determinación de los espesores de las capas existentes (mediante deflectometría); donde se puedan definir las secciones homogéneas y a partir de ello especificar preliminarmente los tramos con nuevos espesores y con materiales ya sea nuevos y/o reciclados.

2.1.2 Investigación detallada

Mediante deflexiones, auscultación de deterioros o por cualquier otro método que se proponga en la investigación preliminar, deberán posteriormente correlacionarse las respuestas de la estructura del pavimento existente (con base en muestreo o excavaciones en el pavimento en ciertos puntos estratégicos), con la resistencia, partiendo de los resultados de ensayos de módulo resiliente del mismo.

La extracción de núcleos permite establecer además del espesor de cada capa, el contenido de humedad en capas granulares o estabilizadas con agentes cementantes, densidad de compactación y estado de deterioro en cada sección.

Las dimensiones de un sondeo o extracción a cielo abierto usualmente son de 1 m x 1 m con una profundidad aproximada de 0,80 m. En ocasiones es necesario realizar un corte superficial transversal para investigar la profundidad de la deformación o si esta se mantiene en todos los carriles de la estructura del pavimento original.

Las muestras seleccionadas representativamente se llevan al laboratorio y se realizan los ensayos típicos para su caracterización y posterior análisis de calidad (Granulometría, límites de Atterberg, California Bearing Ratio (CBR) y Proctor Modificado / Estándar).

Los resultados obtenidos en estos ensayos indican parámetros muy importantes para el análisis de la estructura del pavimento existente y permiten tomar decisiones acerca de la técnica de rehabilitación apropiada en cada sección.

Informe LM-PI-UMP-051-R1	Fecha de emisión: 18 de marzo de 2016	Página 12 de 51
--------------------------	---------------------------------------	-----------------



Asimismo, en conjunto con los ensayos de laboratorio se lleva cabo el análisis estadístico de las deflexiones que se derivan de ensayos de campo, a través de un estudio de retro-cálculo, con el cual se obtiene el módulo elástico en cada capa de la estructura del pavimento existente.

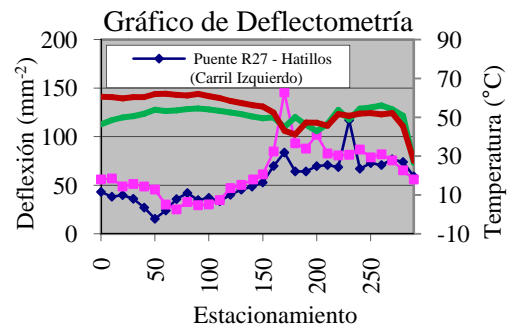
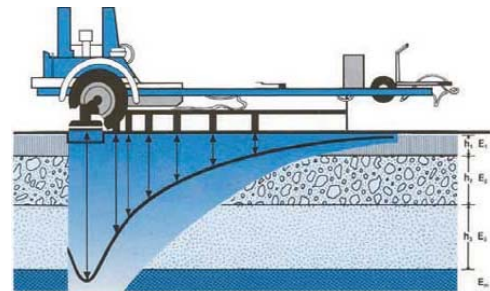


Figura 3. Análisis de deflexiones a partir del ensayo de deflectometría (FWD). Fuente: LanammeUCR (2013)

2.1.3 Diseño preliminar de rehabilitación

Cuando se cuente con los resultados de las características de los materiales existentes, secciones homogéneas, espesores de capas en la estructura y análisis detallado del estado de deterioros del pavimento, es posible estudiar diseños preliminares que permitan principalmente aproximar el tipo de rehabilitación a utilizar en cada sección establecida. Sea a través de métodos de diseño empíricos para caminos de bajo volumen de tránsito o métodos de diseño mecánicos para rutas de alto tránsito, en esta etapa se deberá considerar la alternativa que logre un pavimento costo-efectivo. Es decir, obtener el diseño

de pavimento más rentable, considerando su vida útil, la funcionalidad y costos de mantenimiento.

2.1.4 *Diseño de mezcla en laboratorio para materiales reciclados*

Una vez se hayan escogido los tres principales tipos de rehabilitación posibles a utilizar en cada sección homogénea, se procede a realizar el diseño del material en el laboratorio, para cada una de ellas. De manera que se definan los espesores en función de las condiciones del lugar (sociales, ambientales, económicas y de tránsito), por el método de tratamiento más efectivo.

El material reciclado de la capa de ruedo debe ser igualmente caracterizado y ensayado en el laboratorio para obtener un diseño de mezcla de acuerdo a su granulometría y a los aportes del asfalto dentro de la mezcla. Lo más importante cuando se ensaya el RAP o material de la capa de ruedo es que este debe representar lo mejor posible la granulometría y proporcionalidad en la que se recuperará y dosificará respectivamente en la construcción. Para ello será necesario extraer el material con una recuperadora pequeña o triturarlo en laboratorio; para así lograr las características que se obtendrían utilizando una recuperadora a escala natural en campo y/o agregando la porción de agregado nuevo requerido para lograr la calidad del material reciclado esperado.

El diseño del material en laboratorio puede implicar el uso de agentes estabilizadores para mejorar ciertas características que no posee el material existente de manera intrínseca. Algunos de estos agentes son: cemento, cal, emulsión asfáltica y asfalto espumado.

Una forma preliminar para conocer cuál de los agentes estabilizadores es el más adecuado para cada tipo de material (de acuerdo a sus características), se muestra en la Figura 4.

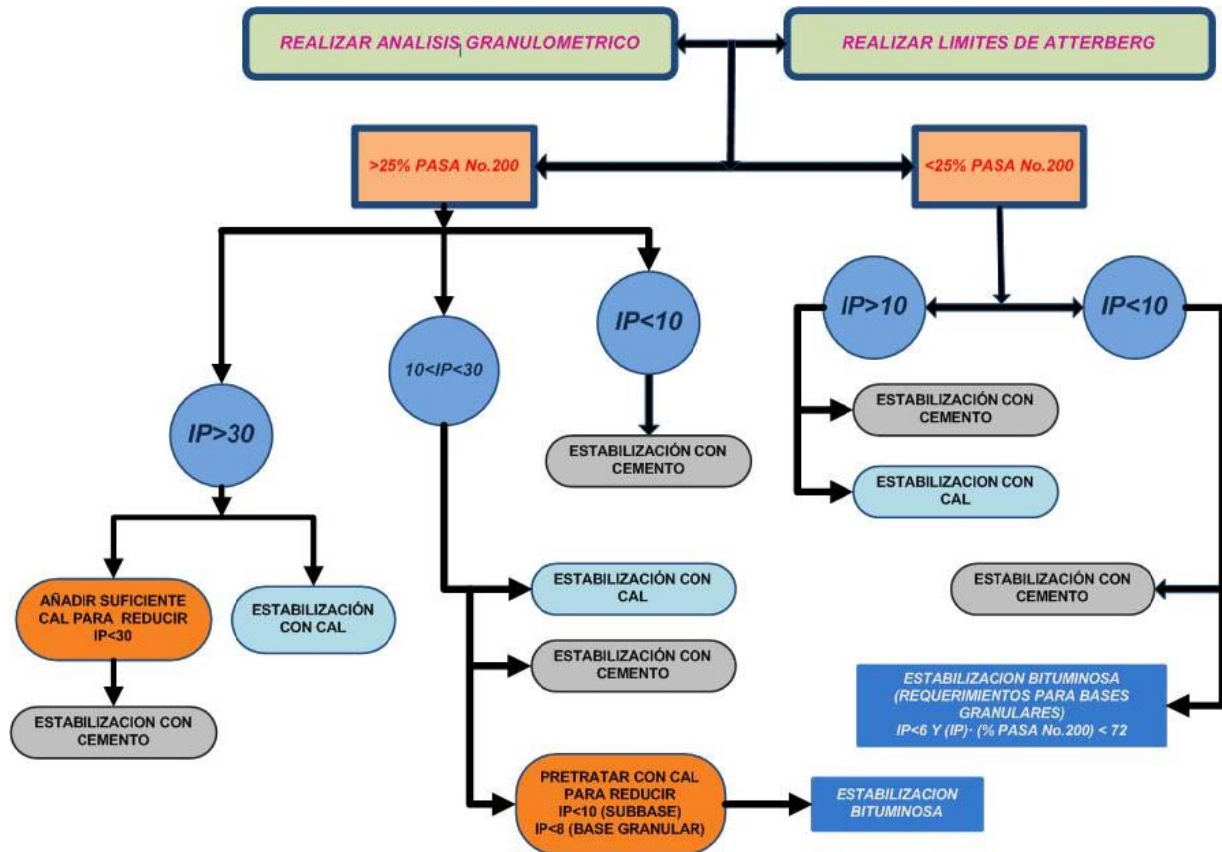


Figura 4. Índice de selección para la estabilización de materiales granulares.
Fuente: FHWA (1992).

2.1.5 Características de los materiales recuperados

De acuerdo a la Guía Técnica para la Estabilización de Materiales con Bitumen del Asphalt Academy (2009), los materiales candidatos a ser estabilizados con asfalto espumado se clasifican en tres tipos, dependiendo de la calidad del material de matriz y el tráfico de diseño. Dicha clasificación se denota como: MEB1, MEB2 y MEB3 (Material Estabilizado con Bitumen). Estos se describen a continuación:

- MEB1: Este material tiene alta resistencia al corte, y es típicamente utilizado como capa de base para un tráfico de diseño de más de 6 millones de ESALs. Para esta clase de material sin tratar, la fuente es típicamente roca triturada bien graduada, pavimento asfáltico reciclado (RAP) o una mezcla de ambos.



- MEB2: Este material tiene resistencia moderada al corte, y es típicamente utilizado como capa de base para un tráfico de diseño entre 3 y 6 millones de ESALS. Para esta clase de material la fuente de material sin tratar, es generalmente grava natural graduada, o una mezcla de varios materiales, entre ellos RAP.
- MEB3: Este material consiste típicamente en suelo-grava y/o arena, estabilizados con altos contenidos de asfalto espumado. Como capa de base es adecuado solamente para aplicaciones de tráfico de diseño menores a 3 millón de ESALS.

2.1.6 Procedimiento de diseño de mezcla

Existen tres niveles de diseño de mezcla según la Guía Técnica para la Estabilización de Materiales con Bitumen (Asphalt Academy, 2009). El diagrama de flujo que se muestra a continuación describe cada uno de ellos.

**Figura 5. Niveles de diseño.
Fuente: Asphalt Academy (2009)**

Informe LM-PI-UMP-051-R1	Fecha de emisión: 18 de marzo de 2016	Página 17 de 51
--------------------------	---------------------------------------	-----------------



Donde, las abreviaturas utilizadas en la figura 5 corresponden a lo siguiente:

- ITS (Indirect Tensile Strength) es la resistencia a la tensión diametral al daño inducido por la humedad (RRTD, por sus siglas en español).
- MIST (Moisture Induction Simulation Test) es un ensayo novedoso que simula la influencia de la humedad en los materiales utilizados como bases.
- DEMAC (Design Equivalent Material Class) es un material que presenta características de corte, rigidez y flexión similares a los que presentaría un material completamente nuevo.

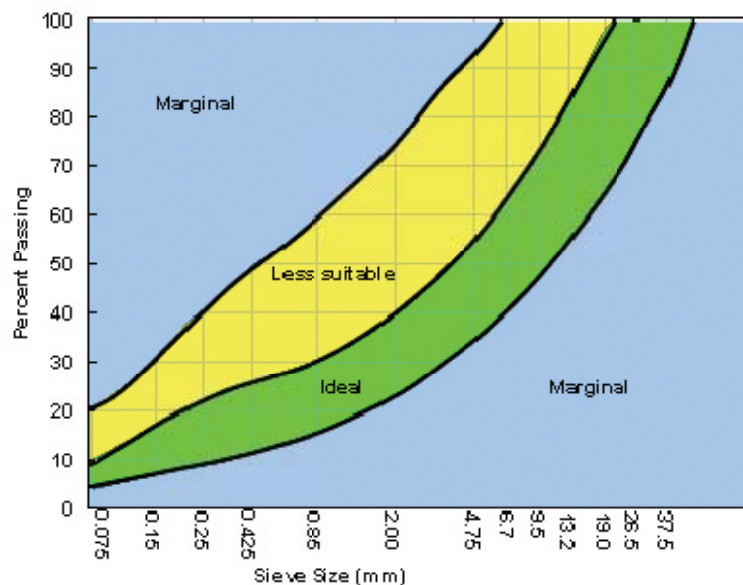


Figura 6. Curva granulométrica.
Fuente: Asphalt Academy (2009).



Tabla 1. Gradación para material estabilizado con asfalto espumado (AASHTO T 27, T11)

Especificación para estabilización con asfalto espumado (% pasando)				
Tamiz		Granulometría recomendada		Graduación límite final ⁽¹⁾
No	mm	Límite inferior	Límite superior	Límite Superior
2"	50	100	100	100
1,5"	37,5	87	100	100
1"	25	76	100	100
3/4"	19	65	100	100
1/2"	12,5	55	90	100
3/8"	9,5	48	80	100
1/4"	6,7	41	70	100
N° 4	4,75	35	62	88
N° 8	2,36	25	47	68
N° 16	1,18	18	36	53
N° 30	0,600	13	28	42
N° 40	0,425	11	25	38
N° 50	0,300	9	22	34
N° 100	0,150	6	17	27
N° 200	0,075	4	12	20

⁽¹⁾ Esta granulometría deberá combinarse con RAP o agregado con una granulometría gruesa que permita mejorar y lograr la graduación recomendada.

Los materiales a estabilizar como capa de base se caracterizan por ser materiales granulares, material reciclado o una mezcla de ambos, con granulometrías continuas con poco o ninguna plasticidad. Las granulometrías recomendadas se definen en la Figura 6 y la Tabla 4.

2.1.7 Agentes estabilizadores

Los materiales a tratar pueden ser parte o toda la capa asfáltica ya deteriorada, y/o capas parciales o la totalidad de la base granular. La aplicación de agentes estabilizadores depende del valor de resistencia obtenido para las muestras de material extraído de la ruta a rehabilitar.

Informe LM-PI-UMP-051-R1	Fecha de emisión: 18 de marzo de 2016	Página 19 de 51
--------------------------	---------------------------------------	-----------------



Existe una gran variedad de agentes estabilizadores, pero todos tienen como objetivo ligar las partículas de agregado para aumentar la resistencia y lograr un material más resistente al agua. Estos agentes pueden ser compuestos químicos como cloruro de calcio, polímeros, productos derivados del petróleo (aceites sulfonados) y algunos productos y agentes más convencionales como cemento y asfalto. En mayor o menor grado cada agente funciona mejor para materiales específicos y su costo varía igualmente.

El cemento y la cal son los agentes estabilizadores más usados a nivel mundial, los cuales aportan un incremento en la capacidad soportante de los materiales granulares, según el nivel de plasticidad se utiliza uno u otro (según se mostró en la figura 4).

Los agentes estabilizadores asfálticos son más recientes y no hace muchos años que se han venido utilizando en la rehabilitación de pavimentos. Su aplicación es en forma de emulsión asfáltica ó como asfalto espumado, los cuales brindan de un modo eficaz la resistencia buscada a un menor precio, minimizando los efectos perjudiciales al medio ambiente.

2.1.8 Asfalto espumado

El proceso del asfalto espumado consiste en elevar la temperatura del asfalto entre 155 °C y 180 °C, una vez alcanzada esta temperatura, se mezcla con una pequeña cantidad de agua atomizada en una cámara de expansión y aire a una presión aproximada de 5 bares (100 kPa), tal como se muestra en la Figura 7. Cuando las partículas de agua entran en contacto con el asfalto caliente, la energía calórica del asfalto se transfiere al agua. Tan pronto como el agua alcanza su punto de ebullición ésta cambia de estado, y al hacerlo, crea una burbuja con una delgada película de asfalto llena con vapor de agua. (Wirtgen, 2004).

Un aspecto relevante en esta técnica es que el estado de espumado del asfalto es temporal, durante este periodo baja su viscosidad, lo que permite que la mezcla con el agregado a una temperatura ambiente y con contenidos de humedad in-situ, se pueda dar.

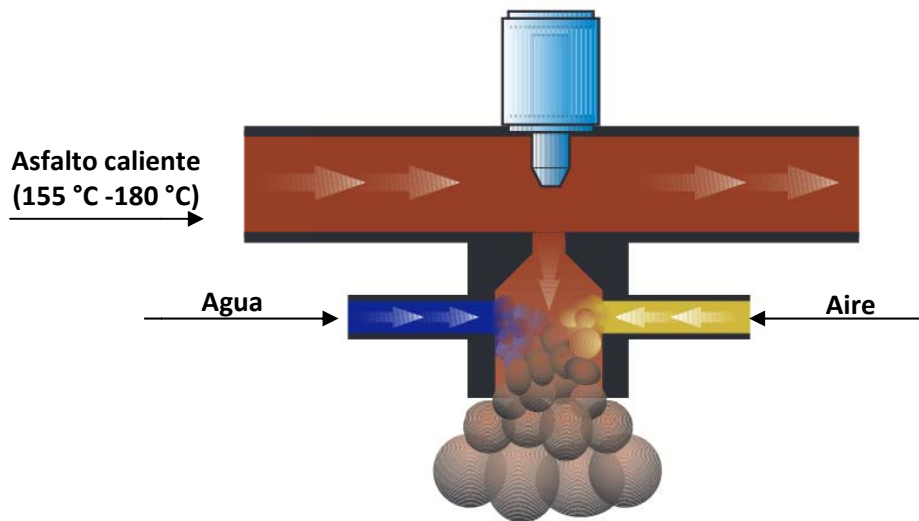


Figura 7. Producción de asfalto espumado.
Fuente: Wirtgen (2004).

Las propiedades principales del asfalto espumado son:

- Razón de expansión: es una medida de la viscosidad de la espuma y define cuánto se llega a dispersar el asfalto en la mezcla. Se calcula como la razón entre el máximo volumen de la espuma relativo a su volumen original.
- Vida media: es una medida de estabilidad de la espuma y provee una indicación de la tasa de colapso de la espuma. Se calcula como el tiempo, en segundos, que transcurre para que la espuma colapse a la mitad de su volumen máximo.

Se deben tomar algunas consideraciones esenciales para no afectar el asfalto espumado como estabilizador:

Se debe añadir la cantidad de agua adecuada para obtener la vida media y razón de expansión óptimos, de acuerdo con las Figuras 8 y 9.

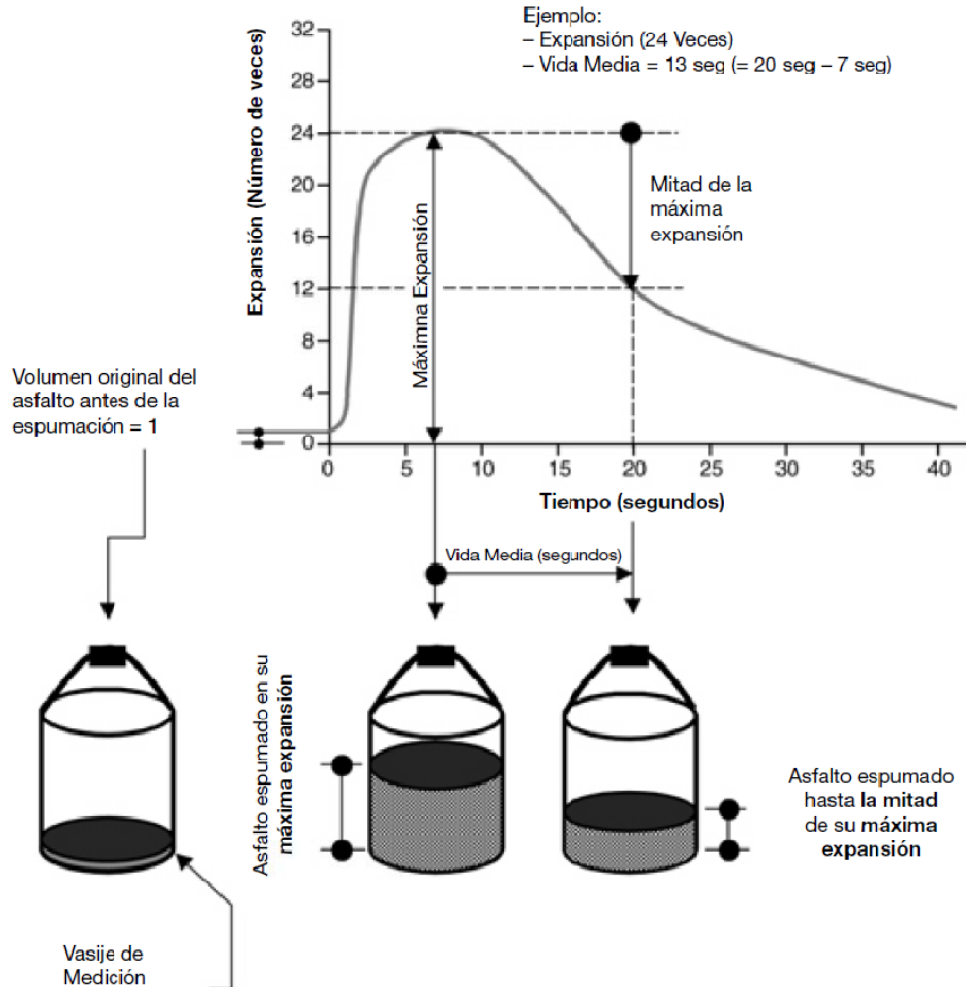


Figura 8. Características del asfalto espumado.
Fuente: Wirtgen (2004).

Lo recomendable es utilizar asfaltos menos rígidos, debido a que conforme aumenta la rigidez de los mismos, disminuyen la calidad de la espuma y generan una menor dispersión.

Es indispensable que el asfalto alcance temperaturas altas (>155 °C), para disminuir su viscosidad y al entrar en contacto con el agua durante el proceso, se obtenga el espumado requerido.



Los parámetros determinados en laboratorio serán utilizados in-situ a escala real, por ello la importancia de analizar los niveles de espumado para cada asfalto que se vaya a utilizar.

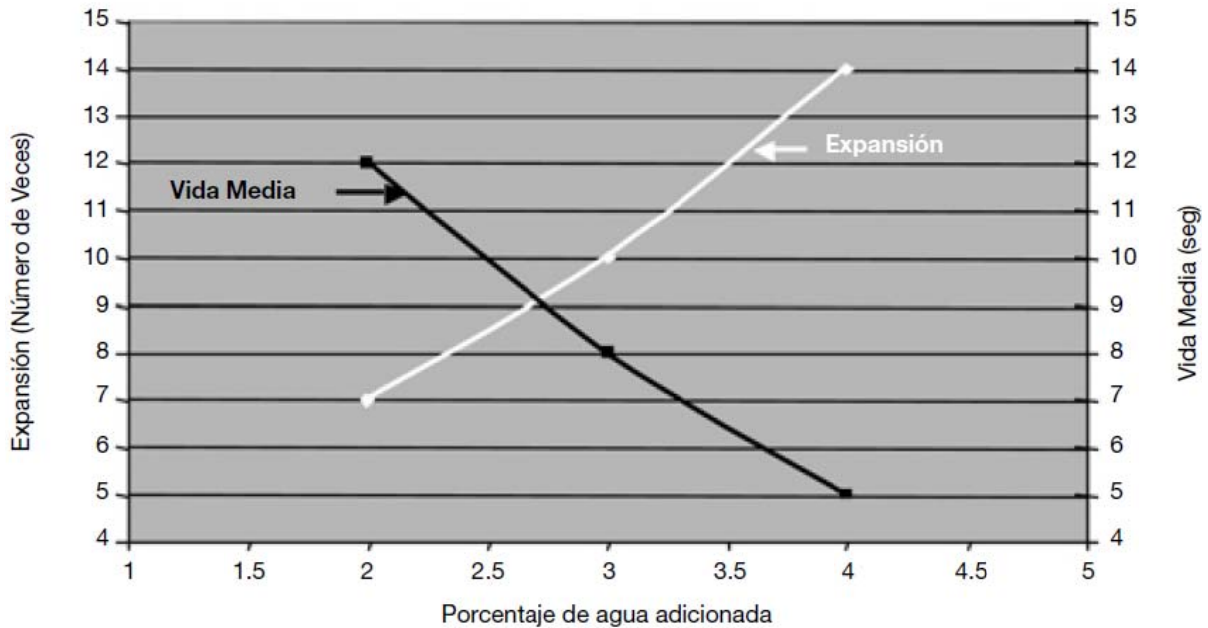


Figura 9. Relación entre propiedades del asfalto espumado.
Fuente: Wirtgen (2004).

Entre las ventajas del asfalto espumado al utilizarse como un agente estabilizador, se tiene que permite abrir al tránsito en un menor tiempo en comparación con otras técnicas, así mismo, el que su modelo de falla sea por deformación permanente y no por fatiga (fractura), es posible realizar cualquier otra intervención menor posteriormente con costos y tiempos menores.

2.1.9 Filler

El relleno mineral, conocido como filler tiene como propósito mejorar la adhesión del asfalto con el agregado, mejorar la dispersión del asfalto en la mezcla, modificar la plasticidad de materiales naturales (reducir IP), aumentar la rigidez de la mezcla, ganar resistencia y acelerar el curado de la mezcla compactada. (Asphalt Academy, 2009). Los tipos de filler utilizados en estabilizaciones con asfalto espumado son: cemento, cal hidratada y en



general, todo aquel material que pase la malla #200. El filler activo (cemento o cal hidratada) altera químicamente las propiedades de la mezcla.

Cuando se utiliza cemento, la aplicación debe limitarse a un máximo de 1% en masa del agregado seco. Cuando se usa cal hidratada, la cantidad se puede incrementar a 1,5% o más en donde se requiere modificar la plasticidad (cuando hay un pre-tratamiento con cal la mezcla se debe dejar reposando 4 horas antes de agregar emulsión asfáltica). Sin embargo, hay que señalar que se da un aumento de la rigidez de la mezcla, por lo tanto la flexibilidad se ve comprometida. Para cantidades superiores de filler, el beneficio del asfalto espumado deja de ser importante (Asphalt Academy, 2009).

2.2 Propiedades esperadas de los materiales candidatos a ser estabilizados con asfalto espumado

Antes de iniciar con los ensayos sobre el material estabilizado con asfalto espumado, se debe caracterizar y verificar el cumplimiento de los materiales granulares y/o RAP; según los siguientes parámetros.

- Límites de Atterberg (AASHTO T 89, T 90)
- CBR (California Bearing Ratio) (AASHTO T 193)
- Granulometría (AASHTO T 27, T11)
- Proctor modificado (AASHTO T 180)

Cuando un material no tiene la cantidad adecuada de finos, el asfalto espumado no se dispersa en forma apropiada y tiende a formar aglomeraciones de material fino con asfalto. 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 10). Debido a lo anterior, se recomienda utilizar porcentajes mínimos de finos de acuerdo a la Tabla 2.

Informe LM-PI-UMP-051-R1	Fecha de emisión: 18 de marzo de 2016	Página 24 de 51
--------------------------	---------------------------------------	-----------------



Tabla 2. Especificaciones recomendadas de los materiales a estabilizar con asfalto espumado

Parámetro de medición	Especificación	Norma de ensayo
Índice de Plasticidad ⁽¹⁾	Máximo 15	AASHTO T 89 y T 90
CBR (California Bearing Ratio) ⁽²⁾	10 - 30	AASHTO T 193
Pasando la malla No. 200 (0,075mm)	2 - 25	AASHTO T 27, T11

⁽¹⁾ En caso de materiales arenosos se recomienda ser tratados previamente para mejorar su plasticidad a valores menores de 7.

⁽²⁾ Materiales con CBR menores a 10 no deberán ser utilizados para estabilizarse con asfalto espumado.

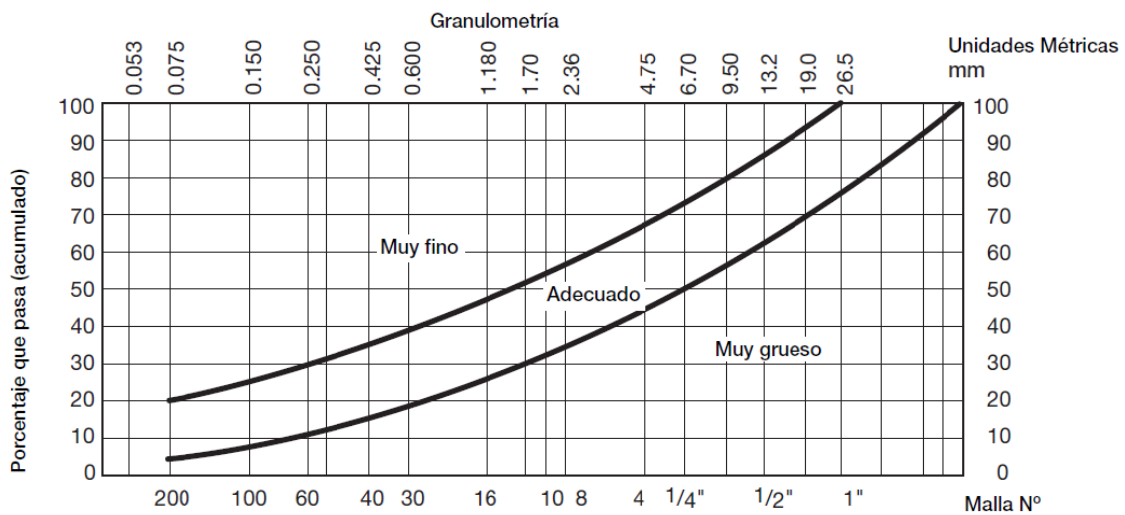


Figura 10. Características de los materiales adecuados para tratamiento con asfalto espumado.

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, sin dejar de lado la respectiva caracterización cumplimiento de parámetros.



En cuanto a las especificaciones de los materiales estabilizados se tiene el ensayo de la resistencia al daño por humedad a la tensión diametral (Figura 11), para el cual se tienen las especificaciones mostradas en la Tabla 3.



Figura 11. Ensayo de resistencia retenida a la tensión diametral.
Fuente: LanammeUCR (2013).

La rigidez de un material estabilizado con asfalto espumado puede ser medida a partir del módulo resiliente (MR). En este ensayo se preparan especímenes Marshall (100 mm de diámetro), iguales a los conformados para el ensayo de resistencia retenida a la tensión diametral y con un curado similar, para luego realizar el ensayo a una frecuencia de 10 Hz y 25 °C a tracción indirecta.

La Tabla 3 muestra las propuestas de los rangos de módulo resiliente en materiales estabilizados con asfalto espumado, ensayados en el laboratorio.

Es importante aclarar que por la pérdida de humedad que puedan sufrir las muestras al trasladarse del sitio de colocación al laboratorio, por la geometría y estado del ensayo en sí, los valores propuestos podrían ser significativamente mayores que aquellos determinados a partir de ensayos triaxiales dinámicos y de viga de fatiga, así como los determinados mediante retro-cálculo a través de ensayos de deflectometría en campo.

A manera de resumen se establecen en la Tabla 3 los rangos de aceptación para la utilización de esta técnica tanto del material previo a estabilizarse como posterior a ser estabilizado, de acuerdo a las resistencias obtenidas y otras características.

Tabla 3. Indicadores para clasificación de MEB para material a estabilizar.

Ensayo	Unidades	MEB1	MEB2	MEB3	No apto
		Roca triturada bien graduada, RAP y/o mezclas de ambos	Gravas naturales graduadas, mezclas de varios materiales, RAP	Suelo-grava y/o arena	Gravas pobres, suelos y materiales plásticos
MATERIAL SIN ESTABILIZAR					
Índice de Soporte California (CBR)	%	>80%	25-80	10-25	<10
Índice de plasticidad (IP)		<6	6-10	10-15	>15
Pasando malla N°200	%	2-15	2-20	2-30	>30
MATERIAL ESTABILIZADO					
ITS sin acondicionamiento (secas)	kPa	>225	175-225	125-175	<125
ITS con acondicionamiento (secas y con humedad de equilibrio)	kPa	>100	75-100	50-75	<50
ITS sin acondicionamiento (humedad de equilibrio)	kPa	>175	135-175	95-135	<95
Módulo resiliente	MPa	>2000	600-2000	300-600	>300
RRTD	%	Mínimo 60			-



3 ENSAYOS DE LABORATORIO PARA DISEÑO DE MATERIAL ESTABILIZADO CON ASFALTO ESPUMADO

El procedimiento de diseño de mezcla involucra una serie de pasos en función de la importancia de la carretera o del volumen vehicular. El muestreo permite determinar si los materiales en estudio son aptos para su estabilización con asfalto espumado, y si cumplen con los requisitos, lo que prosigue es establecer los porcentajes de asfalto y agua a utilizar en campo para obtener una adecuada capa estabilizada con asfalto espumado.

3.1 Muestreo y preparación

El método de muestreo del material debe ser representativo tomando en consideración tres aspectos indispensables para el análisis posterior de los resultados:

Profundidad del reciclado, y las proporciones de cada una de las capa in-situ que serán mezcladas para conformar la capa estabilizada.

Variabilidad del material en la longitud y profundidad del pavimento existente. Esto significa que se realizarán todos los diseños de mezcla necesarios para contemplar dicha variación. En los casos donde la variabilidad es significativa o de existir más de una capa por reciclar, el material de cada una de ellas debe ser separado en sus fracciones correspondientes, y luego ser incorporado en las proporciones requeridas, según el diseño determinado.

La recuperación del material en el muestreo deberá ser representativa del material que se utilizará en la estabilización. Esto quiere decir que tanto la granulometría, los límites de Atterberg y a humedad óptima del Proctor, determinadas en el laboratorio como parte del diseño final, sean los equivalentes del material seleccionado para la estabilización.

3.1.1 Muestreo en Campo

Las muestras son obtenidas durante las investigaciones en campo. Cada una de las capas del pavimento, ya sea carpeta asfáltica/ losa de concreto, base, sub base o sub rasante (± 30 cm) deben ser muestreadas separadamente. El tamaño de la muestra dependerá de si se requiere únicamente caracterizar o si además de ello, se realizará un diseño con ellas. A ser:

Informe LM-PI-UMP-051-R1	Fecha de emisión: 18 de marzo de 2016	Página 28 de 51
--------------------------	---------------------------------------	-----------------



- Capas únicamente a caracterizar: 150 kg de material.
- Capas a caracterizar y diseñar: 300 kg de material, debido a que se requieren 150 kg solamente para el proceso de caracterización mencionado anteriormente.

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

3.1.2.1 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.

3.1.2.2 Mezclado de la muestra

Es indispensable, mezclar todo el material muestreado (en el caso de estar utilizando un proceso de reciclado) de manera tal que la nueva distribución sea representativa de toda la profundidad a reciclar. Esta mezcla debe de ser en proporción al espesor y a la densidad del material in situ obtenida inicialmente de cada una de las capas.

Además, se debe obtener la densidad in situ de cada una de las capas después de la estabilización y deben repetirse los ensayos de granulometría y de índice de plasticidad para la muestra mezclada; con el fin de contar con parámetros de comparación.

En caso de aplicar esta técnica (estabilización con asfalto espumado) en una base o sub base granular que no sea reciclada, no es necesario realizar un mezclado de capas, partiendo del hecho de que se conoce la distribución granulométrica y el material como tal ya ha sido caracterizado en su totalidad.

3.1.2.3 Proporción representativa

Al igual que en los procedimientos Marshall (100 mm) y/o Superpave (150 mm), para la elaboración de los especímenes de ensayo se debe separar y corregir la granulometría según las especificaciones que se muestran a continuación, de manera tal que las proporciones sean representativas y se cumpla con el tamaño máximo según el tipo de ensayo a realizar.

Informe LM-PI-UMP-051-R1	Fecha de emisión: 18 de marzo de 2016	Página 29 de 51
--------------------------	---------------------------------------	-----------------



- Retenido en el tamiz de 19,0 mm.
- Pasando el tamiz de 19,0 mm y retenido en el tamiz de 12,5 mm (fracción gruesa).
- Pasando el tamiz de 12,5 mm y retenido en el tamiz de 4,75 mm (fracción intermedia).
- Pasando el tamiz de 4,75 mm.

Una vez clasificado el material según tamaño de partículas, se procede a sustituir el porcentaje correspondiente a la fracción gruesa por el equivalente de la porción intermedia, como en un proceso usual de corrección de granulometría.

Si el material de la fracción intermedia es insuficiente para sustituir el retenido en el tamiz de 19,0 mm, existe la posibilidad de triturar ligeramente el material retenido en esa malla, para incorporar más material a la fracción deficiente; no obstante, debe tenerse especial cuidado durante el proceso de trituración que el tamaño de las partículas sea reducido de manera controlada y que este no se convierta en una pulverización del mismo, debido a que un aumento de la fracción fina no es lo que se pretende alcanzar.

En general, se busca un valor máximo de 8% en el material retenido en el tamiz 19,0 mm.

Debe notarse que la corrección descrita en este rubro, corresponde únicamente a un proceso de laboratorio para el diseño y no a un requerimiento en campo.

3.1.3 *Contenido de humedad higroscópico*

Para obtener contenido de humedad higroscópico (secado al aire) del material se requieren dos muestras representativas de 1 kg aproximadamente. La cantidad de material (muestra) depende directamente del tamaño del agregado. Las muestras se pesan, con una aproximación a 0,1 g, y se colocan en el horno a 105 °C y 110 °C hasta alcanzar una masa constante, en caso de contener material de RAP, se deberán secar a 60°C. El contenido de

Informe LM-PI-UMP-051-R1	Fecha de emisión: 18 de marzo de 2016	Página 30 de 51
--------------------------	---------------------------------------	-----------------



humedad higroscópico es la pérdida de masa expresada como un porcentaje de la masa seca de la muestra.

3.2 Procedimiento de diseño de mezclas para materiales estabilizados con asfalto espumado

3.2.1 Contenido de asfalto espumado

Como se mencionó anteriormente dos parámetros fundamentales en el concepto de asfalto espumado son la expansión y la vida media. Se deben realizar ambos ensayos para una determinada cantidad de asfalto (g), con la distribución granulométrica seleccionada anteriormente, utilizando las temperaturas de 155 °C y 160 °C y cuatro diferentes porcentajes de flujo de agua. Se comparan los resultados de los mismos y se selecciona la combinación de temperatura/ contenido de agua que genere el máximo valor para dichos parámetros (a partir del punto de intersección de las curvas definidas por cada una de los parámetros, respecto al contenido de agua [%]).

Con base en los valores escogidos de temperatura y contenido de agua, se procede a mezclar el 80% de agua con el material granular, de acuerdo a la cantidad óptima de humedad obtenida mediante el ensayo de Proctor. Posterior a ello, se inyecta el asfalto espumado (mientras el material continúa siendo mezclado por un minuto y con un equipo adecuadamente calibrado) en un porcentaje inicial según la Tabla 5, tomado como punto central para la dosificación. Las siguientes dosificaciones serán a $\pm 0,2$ y $\pm 0,4$ de ese valor.

Tabla 4. Estimación de la cantidad de asfalto espumado

Guía para estimar la adición del asfalto espumado

Fracción pasando la malla 0.075 mm	Adición de asfalto espumado (% con respecto al peso seco del agregado)		Tipo de material típico
	Fracción pasando la malla 4.75 mm		
	< 50 %	> 50 %	
< 4	2.0	2.0	RAP
4 -7	2.2	2.4	RAP/ Piedra triturada / Grava natural / Combinaciones
7 - 10	2.4	2.8	
> 10	2.6	3.2	Gravas / arenas

Fuente: Wirtgen (2004)

Informe LM-PI-UMP-051-R1	Fecha de emisión: 18 de marzo de 2016	Página 31 de 51
--------------------------	---------------------------------------	-----------------



Una vez que se haya mezclado, se debe verificar que no se hayan formado hilos de asfalto y que la cohesión en la mezcla sea adecuada. Seguidamente se agrega el 20% de agua restante y se mezcla por 30 segundos; se fabrican los seis especímenes (para cada % de asfalto específico sobre peso de agregado seco, para un total de 30 pastillas) y finalmente se compactan, por medio de método Marshall a 75 golpes por cara, para el ensayo de resistencia a la tensión diametral retenida al daño inducido por humedad.

Los especímenes compactados se dejan en sus moldes por 24 h, seguidamente se desmoldan y se dejan curando en horno a 40 °C por 72 horas. Después del curado, se determinan las dimensiones y la gravedad específica de las pastillas. Y de los seis especímenes, los tres que son acondicionados se deben sumergir en agua a 25 °C por 24 horas.

Posteriormente, se fallan los especímenes tanto acondicionados como sin acondicionar a tensión diametral. Obteniendo curvas como las que se muestran en la Figura 12.

Finalmente, se determinan las resistencias y se calcula el porcentaje de resistencia retenida. Se grafican las resistencias en función del porcentaje de asfalto espumado, y según estas se calcula el porcentaje óptimo de asfalto.

Con base en la granulometría corregida, y el contenido de asfalto se procede a seleccionar los tamaños de muestra para cada uno de los ensayos a realizar. En la Tabla 5 se sugieren cantidades de material requerido para diferentes ensayos.

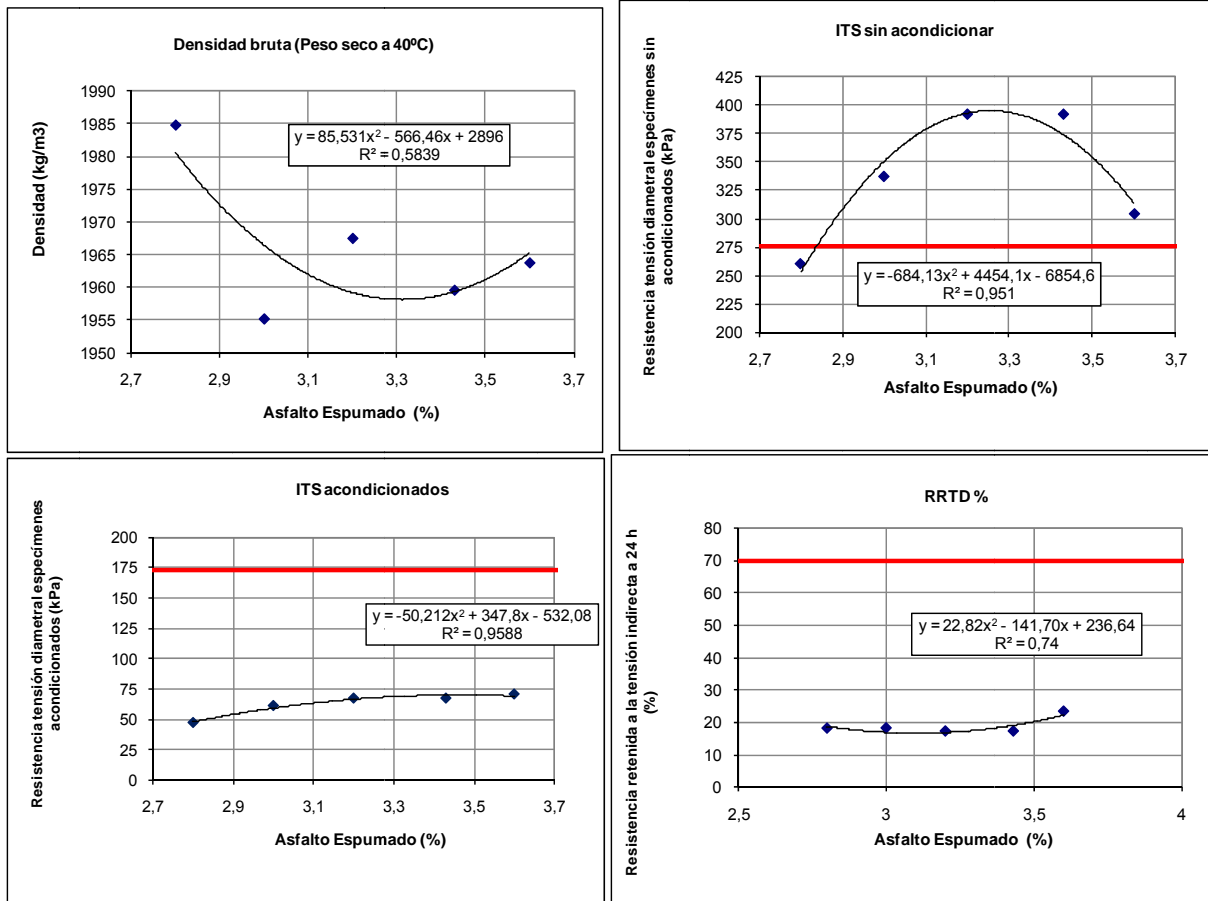


Figura 12. Gráficos de diseño de mezcla asfáltica mediante el método Marshall.
Fuente: LanammeUCR (2013).

Tabla 5. Cantidades de muestra requeridas para diferentes ensayos

Ensayo	Cantidad de muestra requerida
Proctor Modificado, AASHTO T180	5 de 7 kg
Resistencia a la Tracción Indirecta (diámetro 100 mm o 150 mm)	15 - 20 kg por cada contenido (punto) de asfalto espumado
Resistencia a la Compresión Inconfinada (diámetro 150 mm)	20 kg por cada contenido (punto) de asfalto espumado
Diseño de Estabilización con asfalto (Probetas Marshall)	Mínimo 5 puntos (contenido de asfalto espumado) kg por contenido estabilizador
Verificación de la Contenido de Humedad	Aproximadamente 1 kg

A manera de ejemplo, a continuación se muestra resumen de los resultados obtenidos para un diseño de base estabilizada con asfalto espumado y cal (Tabla 6).

Tabla 6. Resumen de resultados de diseño de base estabilizada con asfalto espumado para especímenes compactados mediante el método Marshall

Ensayo	Resultados	Especificación	Unidades	Condición
Porcentaje óptimo asfalto (PTA) ¹	3,20	-	%	-
Porcentaje óptimo de agua para espumar (PTA)	2,60	-	%	-
Porcentaje de humedad utilizada ⁴	12,4	-	%	-
Filler	1% cal	1 a 1,5 máximo	%	Cumple
Gravedad específica bruta ³	1,925 ± 0,010	-	NA	-
Resistencia en especímenes secos ³	343 ± 23	> 225 ²	kPa	Cumple
Resistencia en especímenes acondicionados ³	256 ± 9	> 100 ²	kPa	Cumple
Resistencia retenida (RRTD) ³	75	≥ 70	%	Cumple
¹ Se obtuvo a partir del valor de resistencia obtenido en las pruebas de falla a la tensión diametral.				
² Con respecto a la calibración realizada a 160°C.				
³ De acuerdo a los ensayos de laboratorio mostrados en las Tablas 1 y 2.				
Un 80% de la óptima reportada antes de de mezclarse con el asfalto y el restante 20% luego del espumado para compactar				
⁴ Developing Standards and Specifications for Full Depth Pavement Reclamation, Pennsylvania Department of Transportation, 2012. Y el criterio experimental de los resultados en laboratorio.				
⁵ Jenkins, Kim, 2009, Technical Guideline: Bitumen Stabilized Material, A Guide for Design and Construction of Bitumen Emulsion and Foamed Bitumen Stabilized Materials.				

3.2.2 Exigencias del filler activo

La estabilización con asfalto espumado es realizada normalmente en combinación con una pequeña cantidad de filler activo (cemento o cal hidratada). La Tabla 7 muestra tasas de aplicación recomendadas en función del material que se desea estabilizar.

Tabla 7. Especificación recomendada de uso de filler activo

Tipo de filler	Dosificación máxima
Cal	Agregar 1,5 %
Cemento ⁽¹⁾	Agregar 1%

⁽¹⁾ El cemento deberá ser específico para las características de cada material.



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.

3.2.3 *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 adecuada de las burbujas de asfalto.

3.2.4 *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 (Proctor Modificado-AASHTO T 180), para obtener el contenido óptimo de humedad del agregado.

Se debe secar la muestra de agregado hasta que la masa sea 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.



3.2.5 Preparación del material estabilizado con asfalto espumado

3.2.5.1 Preparación de materiales estabilizados con asfalto espumado

Como se mencionó anteriormente, las propiedades de espumación de cada tipo de asfalto están caracterizadas por la razón de expansión y la vida media.

El objetivo es determinar la temperatura y el porcentaje de agua requerida para producir las máximas propiedades de la espuma para un asfalto en particular. Esto es determinado para tres diferentes temperaturas de asfalto como se describe en los pasos a continuación:

1. Aumentar la temperatura del asfalto entre 100 °C y 110 °C; esto pretende obtener una mejor trabajabilidad (estado líquido) y que al momento de colocarlo en el tanque del equipo este logre elevarle la temperatura hasta la de trabajo (155 °C - 165 °C y 170 °C para asfaltos muy rígidos). Todos los componentes del equipo deben estar a la misma temperatura; una vez alcanzada esta, se puede dar inicio a la calibración.
2. Calibrar la razón de descarga de asfalto y ajustar el temporizador según el equipo a utilizar.
3. Ajustar el medidor de caudal de agua, según la razón de inyección requerida comenzando con un 1% de la masa de agua.
4. Descargar el asfalto espumado dentro de un recipiente de acero que se encuentre a una temperatura cercana a los 75 °C, para no generar un choque térmico entre el asfalto y la superficie del recipiente. Una vez que la descarga se detiene, se debe iniciar la medición del tiempo, con ayuda de un cronómetro.
5. Medir la altura máxima alcanzada por el asfalto espumado en el recipiente por medio de una varilla. Esta medición corresponde a la máxima expansión.
6. Por medio del cronómetro se debe medir el tiempo que tarda la espuma en colapsar hasta la mitad de la expansión (volumen) máxima. Esta duración se conoce como la vida media del asfalto espumado.



- Realizar los pasos anteriores hasta alcanzar 3 lecturas similares.
- Repetir los pasos del 3 al 7 para al menos tres razones de asfalto, variando la inyección de agua en: 1%, 1,5 % y 2 %.
- Trazar la curva de la razón de expansión versus la de la vida media para las diferentes razones de inyección de agua sobre los mismos ejes. El contenido de agua óptimo es el promedio de los dos contenidos de agua requeridos para encontrar criterios mínimos (Figura 13).
- Repetir todo el procedimiento descrito anteriormente para otras dos temperaturas de asfalto (normalmente 160 y 165°C).

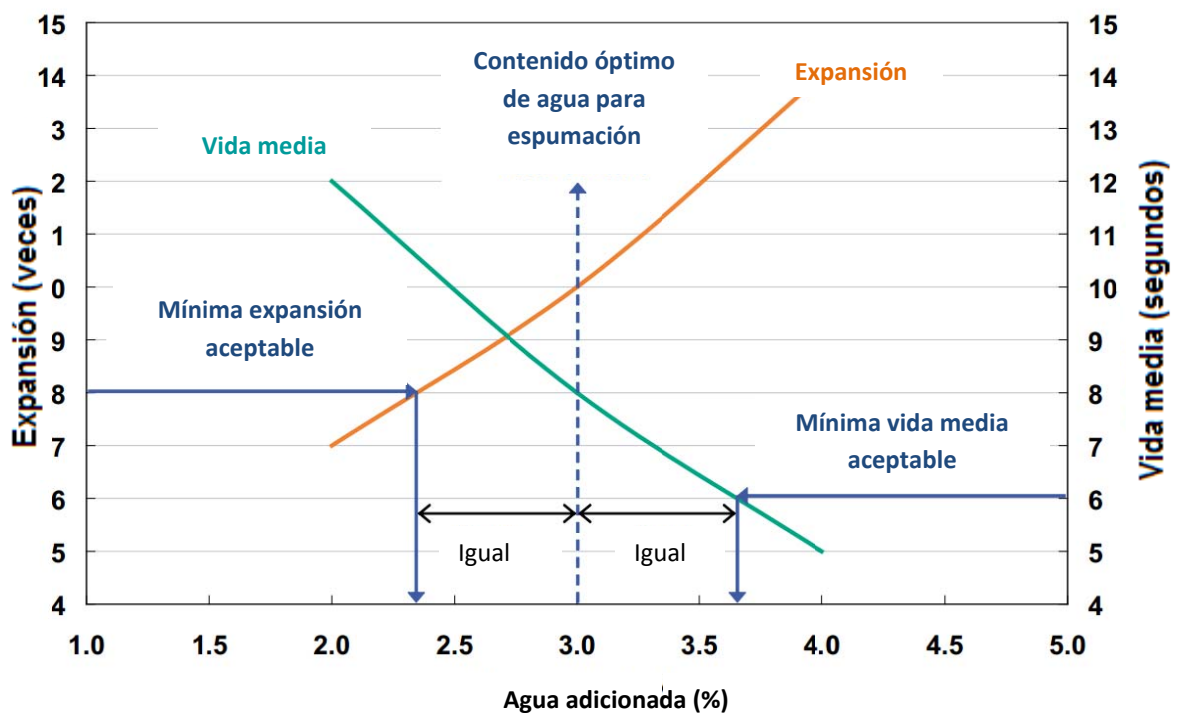


Figura 13. Determinación del contenido de agua óptimo para la espumación.

Como valores mínimos aceptables para una estabilización efectiva se tienen:

- Razón de expansión: 8 veces

Informe LM-PI-UMP-051-R1	Fecha de emisión: 18 de marzo de 2016	Página 37 de 51
--------------------------	---------------------------------------	-----------------

- Vida media: 6 segundos

Si el asfalto en estudio no presenta estos requerimientos mínimos, no es adecuado para espumación.

3.2.5.2 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:

Dentro de un contenedor adecuado para este fin, colocar la cantidad de muestra requerida. Para lo cual se establece un tamaño de muestra de al menos 10 kg de agregado en cada porción de mezcla.

Con base en la siguiente ecuación, se determina la masa seca de la muestra:

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

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 (%)

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} : Masadecalocementorequerido(g)

C_{add} : Porcentajedecalocementorequerido (g)

Informe LM-PI-UMP-051-R1	Fecha de emisión: 18 de marzo de 2016	Página 38 de 51
--------------------------	---------------------------------------	-----------------



Determinar el porcentaje de agua a ser añadida de mezcla (el 80% de la cantidad total a añadir) para lograr un mezclado óptimo, con base en la siguiente ecuación:

$$W_{add} = 0.80 * (W_{OMC} - W_{MSA})$$

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

Se debe mezclar de manera uniforme la muestra de agregado, el agua y el filler activo. Con el fin de que no quede material adherido a las paredes del mezclador, se debe realizar inspección posterior al mezclado. Si se presentaran acumulaciones de material, se debe mezclar una nueva muestra con un contenido de humedad menor al utilizado. Para esta muestra, es importante comprobar que se mezcla fácilmente y permanezca en un estado suelto o esponjado. Si se presentaran grumos o partículas de polvo al final del proceso de mezclado, adicionar pequeñas cantidades de agua y realizar un mezclado nuevamente hasta que el estado sea suelto y sin polvo.

Una vez alcanzada esta condición, se procede a determinar la cantidad de asfalto espumado a ser agregado, utilizando la ecuación que se presenta a continuación:

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



Donde:

$M_{asfalto}$: masadeasfaltoagregado (g)

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

Se debe colocar el mezclador mecánico junto al equipo de espumado, esto con el fin de que el asfalto espumado pueda ser descargado directamente en el mezclador.

Iniciar el mezclado y mantenerlo durante al menos 10 segundos previo a la dosificación del asfalto espumado. Continuar el mezclado durante 30 segundos más, posterior a la aplicación del asfalto espumado.

El contenido de humedad óptimo está asociado a una cierta cantidad de agua requerida, esta se puede obtener con base en la ecuación siguiente:

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

Donde:

M_{plus} : Masadeaguaagregada (g)

Una vez calculada, se debe agregar y mezclar hasta lograr que sea uniforme.

El material mezclado debe ser trasladado a un contenedor y ser sellarlo inmediatamente para conservar la humedad. Con el fin de reducir al mínimo la pérdida de humedad de la muestra, se debe elaborar lo antes posible las probetas de 100 mm o 150 mm de diámetro como se describe en las siguientes secciones.

Repetir los pasos para un mínimo de cuatro contenidos diferentes de asfalto espumado. Como mínimo se deben elaborar cinco muestras tratadas con diferente contenido de asfalto.



3.2.6 *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 realiza mediante la Metodología Marshall, la cual se describe a continuación.

3.2.6.1 Compactación (Método Marshall)

Limpiar el molde, collar, plato base y la cara de compactación del martillo. El equipo de compactación debe mantenerse a temperatura ambiente y no ser calentado.

Pesar una cantidad de material suficiente para alcanzar una altura de compactación de $63,5 \text{ mm} \pm 1,5 \text{ mm}$ (aproximadamente 1150 g). Punzar 15 veces la mezcla con una espátula alrededor del perímetro y 10 veces en la parte interior de la superficie; finalmente, con la misma espátula, suavizar la superficie dejándola levemente redondeada.

Compactar la mezcla aplicando 75 golpes con el martillo de Marshall. Se debe asegurar que este caiga libremente. Una vez suministrados los golpes, retirar el molde y el collar del pedestal, invertir la probeta (dar vuelta), volver a colocarla y presionarla firmemente para asegurar que esté firmemente sobre el plato base. Compactar la otra cara de la probeta aplicando nuevamente 75 golpes.

Después de la compactación, retirar el molde del plato base y desmoldar la probeta por medio de un extrusor. Se deben compactar como mínimo seis probetas por porcentaje de asfalto espumado, tres para ensayos de tracción indirecta con tratamiento previo en seco y tres para ensayos con especímenes saturados previamente a la falla.

En ocasiones, cuando el material a utilizar presenta bajos valores de cohesión, se hace necesario esperar 24 horas antes de desmoldar, pretendiendo con esto, permitir que se haya desarrollado resistencia antes de extraerlas.



3.2.6.2 Procedimiento de curado

Sobre una bandeja plana, colocar las probetas e introducirlas en un horno con aire forzado durante 72 horas a 40 °C. Retirar del horno y dejar enfriar a temperatura ambiente.

Después de esto se separan las probetas acondicionadas y las no acondicionadas, las que se van a acondicionar, se colocan en un baño a 25 °C por 24 horas y las que no, solamente se introducen durante las últimas 2 horas en el mismo baño, para ello se envuelven en bolsas y parafilm (membranas) con el fin de que estén a la misma temperatura que las probetas acondicionadas, sin que entren en contacto con el agua.

3.2.6.3 Determinación de la Densidad Bruta

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

1. Medir la altura en cuatro sitios uniformemente espaciados alrededor de la circunferencia y calcular la altura promedio.
2. Determinar la masa.
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)



Si la densidad bruta de alguna de las probetas difiera del promedio en más de 50 kg/m^3 , esta debe ser excluida

Todas las probetas son ensayadas a tracción indirecta, tanto en condición seca como saturada. Los resultados de ambas condiciones son graficados con respecto al contenido de asfalto que fue agregado para cada caso. El contenido óptimo de asfalto es aquel que genera las mejores características de resistencia.

4 NIVELES DE DISEÑO DE MEZCLA

4.1 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.
- El tipo y cantidad de filler activo que se le debe adicionar a la mezcla, mediante el ITS húmedo y el índice TSR.

Es importante resaltar que 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.

Si la demanda de capacidad estructural es mayor (volumen de diseño mayor a los 3 millones de ESALs), se debe emplear un nivel de diseño 2 o 3, según el esquema de la Figura 5; Para más detalle ver anexos.

4.2 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 se puede determinar el contenido de asfalto óptimo con mayor confianza. Este nivel considera los dos siguientes ensayos:

Informe LM-PI-UMP-051-R1	Fecha de emisión: 18 de marzo de 2016	Página 43 de 51
--------------------------	---------------------------------------	-----------------



- Resistencia a la tracción indirecta en condiciones de humedad de equilibrio (ITS equilibrio).
- 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 (Tabla10).

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

4.3 Nivel 3

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.

5 ENSAYOS MECÁNICOS

El diseño de mezcla de materiales estabilizados con asfalto espumado involucra mediciones de las características mecánicas. Para el nivel de diseño 1, se requieren los ensayos de resistencia a la tracción indirecta en especímenes secos y saturados.

5.1 Resistencia a la Tracción Indirecta (ITS)

La resistencia a la tensión diametral al daño inducido por la humedad permite determinar el efecto del agua (la medida en que esta puede separar el asfalto del agregado por una escasa adherencia entre los mismos). Se utiliza como una medida indirecta de la resistencia a la tracción (se aplica compresión, pero las respuestas que se miden son a tracción) y flexibilidad de los materiales estabilizados con asfalto espumado, con el fin de obtener las características de resistencia.



Los resultados de esta prueba son directos, únicamente deben ser corregidos por las irregularidades en la superficie de los especímenes

En este ensayo se utilizan especímenes de 100 mm de diámetro (como se describió anteriormente), a partir de los cuales se determina el contenido de asfalto óptimo y si existe la necesidad de adicionar un filler activo o no; y en qué cantidad.

5.1.1 Determinación de la ITS

La resistencia a la tracción indirecta es determinada a partir de la medición de la carga última de falla de una probeta sometida a una razón de deformación constante sobre su eje diametral. El procedimiento es el que se muestra seguidamente:

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. A partir del valor de la carga máxima, se puede calcular la resistencia a tracción indirecta con la respectiva corrección del área, como se muestra a continuación:

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



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)

El procedimiento descrito anteriormente, aplica tanto para las probetas secas (no acondicionadas) como para las saturadas (acondicionadas).

La susceptibilidad a la humedad del material es generalmente determinada en términos de la Resistencia a la Tracción Retenida (Tensile Strength Retained, TSR), la ecuación que se muestra seguidamente, permite el cálculo de la misma.

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

En la Tabla 8, se presentan los valores que comúnmente se obtienen del ensayo de resistencia a la tensión indirecta para algunos materiales ensayados en laboratorio.

El índice TSR es 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 TSR menor al 50%, un valor de ITS seco mayor a 400 kPa, el material contiene un alto contenido de arcilla y el asfalto aplicado no es efectivo; se recomienda aplicar un tratamiento al material antes del iniciar con el proceso de estabilización con asfalto espumado.



Tabla 8. Resistencia a la tracción indirecta de materiales estabilizados con asfalto espumado

Tipo de material	Probetas 100 mm Marshall		Probetas 150 mm
	ITS_{seco} (kPa)	$TSR_{razón}$	Próctor
			ITS_{equ} (kPa)
RAP/Roca triturada (50/50)	250 a 600	0,8 a 1,0	120 a 250
Roca triturada gradada	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

Sin embargo, de acuerdo a lo propuesto en esta guía los valores para cumplimiento de las resistencias en probetas Marshall de 100 mm, para cualquier material estabilizado con asfalto espumado, se establecieron anteriormente en la Tabla 3.

5.1.2 Determinación de la densidad seca

A partir del contenido de humedad determinado en los ensayos de ITS y con la aplicación de la siguiente expresión, se calcula la densidad seca.

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

Donde:

GS : Densidad seca (kg/cm^3)

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

Vol : Volumen de la probeta (cm^3)

$W_{extraída}$: Contenido de humedad de la probeta del ensayo de ITS (%)

5.1.3 Rigidez de materiales estabilizados con asfalto espumado

El módulo resiliente (MR) de un material estabilizado con asfalto espumado puede ser medido en laboratorio si se somete un espécimen a un ensayo de carga repetitiva (dinámicas). 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 la Tabla 9.

Informe LM-PI-UMP-051-R1	Fecha de emisión: 18 de marzo de 2016	Página 47 de 51
--------------------------	---------------------------------------	-----------------



Tabla 9. Rangos de módulos resilientes típicos para material estabilizado ensayados en laboratorio

Tipo de material	MR (MPa)
RAP/ Roca triturada (50/50)	2500 a 4000
Roca triturada gradada	2000 a 3000
Grava natural (IP<10 y CBR <30)	1500 a 3000

6 MATERIALES ESTABILIZADOS CON ASFALTO ESPUMADO

6.1 Clasificación de materiales estabilizados con asfalto espumado

A partir del ensayo de ITS es posible clasificar el material estabilizado con asfalto espumado. La tabla a continuación permite realizar dicha clasificación en las tres clases mencionadas.

Tabla 10. Clasificación de los materiales a partir de los resultados del ensayo ITS

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

6.2 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 tabla 11 son útiles para definir un contenido de asfalto aproximado en el diseño de mezclas. Estos rangos

Informe LM-PI-UMP-051-R1	Fecha de emisión: 18 de marzo de 2016	Página 48 de 51
--------------------------	---------------------------------------	-----------------



de aplicación generalmente son aplicables cuando se utiliza un 1% de filler activo (cal o cemento) en la mezcla.

Tabla 11. Porcentaje de asfalto espumado aproximado en función de la granulometría

Porcentaje que pasa la malla		Porcentaje de asfalto espumado	
4,75 mm	0,075 mm	(% en peso sobre el agregado seco)	
< 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 la tabla 11 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 alcanzar las propiedades requeridas, este rango de aplicación se denomina "contenido mínimo de asfalto".

6.3 Consideraciones climáticas

La temperatura afecta el proceso de espumación. Temperaturas bajas en el agregado dificultan una dispersión adecuada del asfalto espumado en la mezcla. Por tanto, debe tenerse especial cuidado cuando se utiliza asfalto espumado a temperaturas bajas (del agregado), particularmente cuando estas antes de mezclarse se encuentran entre 10 y 15 °C. A temperaturas por debajo de 10 °C no se debe realizar este tipo de tratamiento.



7 COMENTARIOS FINALES

7.1 Uniformidad del mezclado in-situ

El material a utilizar para la estabilización con asfalto espumado, ya sea agregado nuevo RAP y/o combinaciones de los anteriores, debe ser mezclado y caracterizado adecuadamente, de manera que las propiedades determinadas a nivel de laboratorio sean reproducidas lo más preciso posible. Esto con el fin de que todas las condiciones de diseño reflejen el desempeño real de la estructura en el campo. Por tanto, la aplicación en tramos de carretera donde las propiedades de los materiales sean muy variables, debe ser considerada con mucho detenimiento.

7.2 Cantidades óptimas

En la estabilización de bases granulares es indispensable el cuidado de la adición de agua para alcanzar la humedad requerida, así como el uso de maquinaria adecuada para la recuperación del material a reciclar y la correcta dosificación del asfalto espumado, el cual sólo se puede aplicar con la maquinaria especializada para el espumado del asfalto, sin que sobre mencionar el control de una apropiada compactación final.

7.3 Condiciones previas a la habilitación del tráfico

El respectivo curado antes de abrirse el pavimento al tránsito y posterior a la compactación, es fundamental para obtener la resistencia de diseño requerida. Después de la estabilización con asfalto espumado, existen varias alternativas para la superficie final de ruedo; se podría colocar un sello o una mezcla asfáltica como impermeabilizante, la decisión entre ellas va a depender de los requerimientos de capacidad estructural de la vía en rehabilitación/reconstrucción y del criterio del profesional responsable.

8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Asphalt Academy (2009). Technical Guideline: Bitumen Stabilized Materials. Segunda Edición. Mayo 2009. ISBN 978-0-7988-5582-2

Informe LM-PI-UMP-051-R1	Fecha de emisión: 18 de marzo de 2016	Página 50 de 51
--------------------------	---------------------------------------	-----------------



**UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA**



**LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES**

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.