



Diseño de bases estabilizadas con asfalto espumado

Horacio Delgado Alamilla
Fidel García Hernández
Domingo Eduardo Campos Hernández

Publicación Técnica No. 519
Sanfandila, Qro, 2018

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

Diseño de bases estabilizadas con asfalto espumado

Publicación Técnica No. 519
Sanfandila, Qro, 2018

Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Infraestructura del Instituto Mexicano del Transporte, por el Dr. Horacio Delgado Alamilla, el M.I. Fidel García Hernández y el M.I. Domingo Eduardo Campos.

Esta investigación es el producto final del proyecto de investigación interna II 20/16: “Evaluación de las propiedades mecánicas de una base reciclada mediante la técnica de asfalto espumado”.

Contenido

Índice de tablas	iii
Índice de figuras	v
Sinopsis.....	ix
Abstract	x
Resumen ejecutivo	xi
Introducción.....	1
1 Revisión bibliográfica	3
1.1 Reciclaje de Pavimentos	3
1.2 Normativa mexicana.....	5
1.3 Asfalto espumado	6
2 Metodología	11
2.1 Caracterización de materiales.....	13
2.1.1 Material asfáltico.....	13
2.1.2 Material pétreo y RAP.....	15
2.2 Granulometría de diseño.....	16
2.2.1 Densidad seca máxima	18
2.2.2 Proporción representativa.....	18
2.3 Propiedades espumantes del asfalto	19
2.3.1 Determinación de espumado óptimo	21
2.4 Diseño de la mezcla de materiales (fórmula de trabajo)	22
2.4.1 Nivel I. <i>Filler</i> activo.....	23
2.4.2 Nivel II. Contenido óptimo de asfalto espumado.....	29

2.4.3	Nivel III. Determinación de propiedades mecánicas	31
2.5	Indicador para el diseño estructural de pavimentos	38
2.5.1	Instrumentación de la prueba de módulo de resiliencia.....	38
2.5.2	Ensayo de la prueba módulo resiliente.....	39
3	Diseño de una base estabilizada con asfalto espumado	47
3.1	Características de los materiales asfálticos	47
3.2	Caracterización del material pétreo y RAP.....	48
3.3	Granulometría de diseño.....	49
3.3.1	Dosificación de materiales.....	49
3.3.2	Densidad máxima	50
3.3.3	Proporción representativa.....	51
3.4	Propiedades espumantes del asfalto	52
3.5	Diseño nivel I.....	54
3.6	Diseño nivel II.....	55
3.7	Diseño nivel III.....	57
4	Indicador para el diseño estructural de pavimentos: módulo de resiliencia ...	60
5	Conclusiones.....	63
6	Bibliografía	65
	Anexo A.....	67

Índice de tablas

Tabla 2.1 Ajustes de grado PG en el territorio mexicano	14
Tabla 2.2 Determinación de pretratamiento con <i>filler</i>	15
Tabla 2.3 Valores límite para curvas granulométricas.....	17
Tabla 2.4 Elaboración de proporción representativa	19
Tabla 2.5 Límites mínimos para asfalto espumado	22
Tabla 2.6 Estimación inicial de asfalto espumado.....	23
Tabla 2.7 Características de los especímenes nivel I.	25
Tabla 2.8 Procedimiento de acondicionamiento para ITS nivel I.....	26
Tabla 2.9 Características mínimas de aceptación para especímenes nivel I	29
Tabla 2.10 Características de los especímenes nivel II.	30
Tabla 2.11 Procedimiento de curado para ITS nivel II.....	30
Tabla 2.12 Parámetros mínimos de diseño nivel II.....	31
Tabla 2.13 Características de los especímenes según su nivel de diseño	33
Tabla 2.14 Procedimiento de curado para ITS nivel III.....	36
Tabla 2.15 Parámetros mínimos de diseño para el nivel III.....	37
Tabla 2.16 Secuencia de ensayo para una base granular	39
Tabla 3.1 Resultados de calidad del material asfáltico analizado (grado PG).....	47
Tabla 3.2 Grado PG del asfalto analizado.....	48
Tabla 3.3 Resultados plásticos de los materiales analizados.....	48
Tabla 3.4 Material requerido en proporción representativa para elaboración de nivel II de la mezcla II	51

Tabla 3.5 Material requerido en proporción representativa para bacheo de 23 kg de mezcla II	51
Tabla 3.6 Propiedades espumantes del asfalto a diferentes temperaturas	53
Tabla 3.7 Valores de cohesión y fricción para la mezcla II.....	58
Tabla A.1 Características del material granular recuperado	68
Tabla A.2 Requerimientos granulométricos BSM.....	69
Tabla A.3 Características del asfalto espumado (límites mínimos)	72
Tabla A.4 Determinación de pretratamiento con filler.....	72
Tabla A.5 Estimación inicial de asfalto espumado	73
Tabla A.6 Procedimiento de acondicionamiento para nivel I.....	73
Tabla A.7 Características mínimas de aceptación nivel I	74
Tabla A.8 Procedimiento de acondicionamiento para nivel I.....	76
Tabla A.9 Características mínimas de aceptación nivel II	76
Tabla A.10 Parámetros mínimos de diseño nivel III	77
Tabla A.11 Parámetros mínimos de diseño nivel III	78

Índice de figuras

Figura 1.1 AEI del reciclaje.....	4
Figura 1.2 Cámara de expansión para asfalto espumado	6
Figura 1.3 Comparación de una probeta de base estabilizada con asfalto espumado (a) vs mezcla asfáltica (b).....	8
Figura 1.4 Material granular (s) no <i>unido</i> , (b) unión continua, (c) unión discontinua	8
Figura 2.1 Elementos fundamentales para el diseño de na base estabilizada con asfalto espumado	11
Figura 2.2 Comportamiento de los materiales en un pavimento	12
Figura 2.3 Diagrama de flujo para el diseño de una base estabilizada con asfalto espumado.....	12
Figura 2.4 Propuesta de diseño para una base estabilizada con asfalto espumado aplicable en México.....	13
Figura 2.5 Regiones geográficas para la utilización recomendable de cementos asfálticos grado PG	14
Figura 2.6 Diagrama de flujo para materiales pétreos.....	15
Figura 2.7 Ejecución de ensayo de límites de consistencia	16
Figura 2.8 Tamices y mallas para el ensayo granulométrico	16
Figura 2.9 Límites granulométricos para bases espumadas	17
Figura 2.10 Molde para variante tipo "D"	18
Figura 2.11 Equipo de laboratorio Wirtgen WLB-10S.....	19
Figura 2.12 Diagrama de flujo de análisis para el material asfáltico.....	20
Figura 2.13 Recipiente y varilla estandarizada para medir la expansión del asfalto espumado.....	20
Figura 2.14 Medición de propiedades espumantes del asfalto espumado	20

Figura 2.15 Ajuste del fluxómetro en el equipo WLB-30S	21
Figura 2.16 Propuesta de los diferentes niveles de diseño para una base estabilizada con asfalto espumado en México	23
Figura 2.17 Procedimiento de acondicionamiento para ensayo de especímenes nivel I.....	24
Figura 2.18 Equipo mezclador de doble eje Wirtgen WLM-30	24
Figura 2.19 Compactador giratorio SERVOPAC	25
Figura 2.20 Especímenes nivel I compactados mediante el compactador giratorio	26
Figura 2.21 Especímenes ITS_{SECO}	26
Figura 2.22 Especímenes $ITS_{SATURADO}$	27
Figura 2.23 Mediciones de especímenes para ITS	27
Figura 2.24 Ensayo de pruebas ITS.....	28
Figura 2.25 Procedimiento de acondicionamiento para ensayo de especímenes nivel II.....	30
Figura 2.26 Proceso de acondicionamiento $ITS_{EQUILIBRIO}$	31
Figura 2.27 Proceso de acondicionamiento $ITS_{EQUI-SAT}$	31
Figura 2.28 Principio de una prueba triaxial	32
Figura 2.29 Gráfica Mohr-Coulomb de pruebas triaxiales monotónicas.....	32
Figura 2.30 Procedimiento de acondicionamiento para ensayo de especímenes nivel III.....	33
Figura 2.31 Características del molde para la elaboración de especímenes	34
Figura 2.32 Molde para la elaboración de especímenes	34
Figura 2.33 Compactación, enrasado y desacoplamiento del molde	35
Figura 2.34 Pesado de espécimen.....	35
Figura 2.35 Proceso de curado de los especímenes	36
Figura 2.36 Colocación de la membrana de látex en el espécimen triaxial	36

Figura 2.37 Regulación de la presión de confinamiento en la membrana	37
Figura 2.38 Montaje e inicialización de la prueba triaxial	37
Figura 2.39 Equipo de laboratorio para módulo de Resiliencia	38
Figura 2.40 Esquema de los componentes de la cámara triaxial	39
Figura 2.41 Colocación de probeta sobre la piedra porosa	40
Figura 2.42 Colocación de membrana de látex	41
Figura 2.43 Colocación de cámara de acrílico	41
Figura 2.44 Ensamblaje final sobre el marco de carga	42
Figura 2.45 Interfaz de ejecución de prueba	42
Figura 2.46 Especímenes ensayados para obtención de M_R	43
Figura 3.1 Curvas granulométricas de los materiales analizados	49
Figura 3.2 Curvas granulométricas finales	50
Figura 3.3 Peso volumétrico seco máximo para mezcla II	50
Figura 3.4 Propiedades espumantes a 160 °C	52
Figura 3.5 Propiedades espumantes a 170 °C	52
Figura 3.6 Propiedades espumantes a 180 °C	53
Figura 3.7 Valor TSR para selección de <i>filler</i> de la mezcla II	55
Figura 3.8 Contenido óptimo de asfalto con 1% de cal	56
Figura 3.9 Cohesión y fricción para 2.4% de asfalto espumado y 1% de cal	57
Figura 3.10 Ensayo triaxial en condición saturada	59
Figura 4.1 Ensayo MR para mezcla II con 2.4% de asfalto espumado y 1% de cal	60
Figura 4.2 Módulo de resiliencia para una base estabilizada con 2.4% de A.E. y 1% de cal	61

Figura 4.3 Comparativa de M_R de la mezcla II estabilizada con 2.4% de AE y 1% de cal vs una base hidráulica tradicional..... 62

Figura A.1 Requerimientos granulométricos BSM..... 71

Sinopsis

La construcción y conservación de nuevas carreteras requiere de muchos recursos tanto naturales como económicos. Por ello, la reutilización de material de la carpeta asfáltica mediante su reciclaje se ha ido consolidando a lo largo de los años. Un ejemplo es la estabilización de bases hidráulicas con asfalto espumado, la cual se ha ido desarrollando en los últimos años en México. Sin embargo, no se tienen referencias de parámetros mecánicos para el diseño estructural del pavimento y la metodología de diseño está basada en el manual “Wirtgen Cold Recycling Technology”, el cual no es un documento público al cual todos los ingenieros interesados en diseñar una base estabilizada tengan acceso.

El estudio presenta una breve revisión bibliográfica del reciclaje de pavimentos y la metodología de asfalto espumado con el objetivo de establecer algunas consideraciones en la aplicación. Como segundo punto, se describe la metodología de diseño de una base estabilizada con asfalto espumado y se presenta un ejemplo de diseño utilizando material producto de reciclaje (RAP). Como último punto, se realizó la evaluación de un parámetro mecánico, valor indispensable para la incorporación de este tipo de material en los métodos de diseño estructural utilizados en México.

Abstract

The construction and maintenance of new roads involve a lot of natural and economic resources. Therefore, the process of recycling asphalt pavement (RAP) has been consolidated over the years in highway projects. One example is the stabilization of base courses with foamed asphalt, developed in recent years in Mexico. However, there are no references of mechanical parameters for the structural design of pavement and the methodology is based on the *Wirtgen Cold Recycling Technology Manual*, not a public document available to all engineers interested in designing stabilized base courses.

This study presents, in first place, a brief bibliographic review of pavement recycling and foamed asphalt methodology with the aim of establishing some considerations in the application of such technology. The second section describes the design methodology of a stabilized base course with foamed asphalt and presents an example of a design using recycled material (RAP). Finally, the evaluation of a mechanical parameter was incorporated into the traditional methodology, which is an indispensable value for integrating this type of material into structural design methods used in Mexico.

Resumen ejecutivo

El reciclaje de pavimento ha ido evolucionando desde sus primeros inicios cerca del año 1900, hasta los estudios realizados por el National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) en estados unidos, aunado a esto la European Asphalt Pavement Association (EAPA) ha promovido el uso de diferentes técnicas de reciclaje en Europa. Lo que ha generado un aumento considerable en el uso de las diferentes técnicas de reciclaje.

Las técnicas de reciclaje de pavimentos asfálticos se dividen en procesos en caliente y en frío, ambas con preparaciones en sitio o en planta. Una de las técnicas utilizadas en México es la estabilización de la base hidráulica con asfalto espumado incorporando el RAP, proceso de reciclaje realizado en frío con el que se trata el material en planta. Esta solución se utiliza en una rehabilitación mediante la recuperación profunda del pavimento (Full-Depth Reclamation, FDR). Esta técnica de reciclaje consiste en retirar toda la carpeta asfáltica existente y la totalidad o una porción de la capa inferior (base hidráulica) para después reutilizarla, previo a un tratamiento o estabilización, en una de las capas estructurales del pavimento.

Sin embargo, en la actualidad no existen registros de las propiedades mecánicas resultantes de la aplicación de esta técnica y los procedimientos de diseño están basados en el *Manual de diseño* de Wirtgen, creador de esta tecnología. Por ello, es indispensable definir procedimientos de diseño y realizar una evaluación de las propiedades mecánicas de una base estabilizada con asfalto espumado incorporando material reciclado, así como determinar los valores de referencia para el diseño estructural de un pavimento con este tipo de estabilización, como es el valor de módulo de resiliencia.

En el primer capítulo se presenta una breve revisión bibliográfica en relación con el reciclaje de pavimentos asfálticos y la normativa mexicana en vigor en la materia. Asimismo, se aborda la tecnología de asfalto espumado y se mencionan algunos de sus beneficios en la estabilización de bases hidráulicas.

La descripción de la metodología de diseño de una base estabilizada con asfalto espumado se presenta en el segundo capítulo. Aquí se abordan los requerimientos de los materiales a utilizar, así como una descripción de los tres niveles de diseño de la base espumada, para los cuales es necesario determinar lo siguiente: la necesidad de un *filler* activo (nivel I), el porcentaje de asfalto espumado óptimo (nivel II) y las propiedades mecánicas mediante un ensayo triaxial (nivel III). Adicionalmente se presenta la descripción del ensayo de módulo resiliente como indicador del desempeño mecánico para el diseño estructural del pavimento.

El tercer capítulo ejemplifica la metodología de diseño presentada en el capítulo anterior. Para esto se realizó el diseño de una base hidráulica con RAP estabilizada con asfalto espumado. En el ejemplo de diseño se presentan diferentes comentarios a considerar durante el diseño de la base espumada.

Finalmente, el último capítulo presenta una evaluación del indicador para el diseño estructural de pavimentos, la cual consiste en un ensayo de módulo resiliente en suelos granulares. Los valores obtenidos de este ensayo pueden utilizarse en los métodos de diseño estructural de pavimentos asfálticos comúnmente utilizados en México.

Introducción

La construcción de pavimentos nuevos consume muchos recursos tanto económicos como naturales, principalmente por cuanto a los materiales que conforman las capas estructurales del pavimento por ser éstos no renovables.

Por esta razón, es importante mencionar que una de las metodologías utilizadas a nivel mundial para mitigar el consumo de los materiales en la construcción de pavimentos es la reutilización del material de la carpeta asfáltica. A este método se le conoce en inglés como Reclaimed Asphalt Pavement (RAP).

Las diferentes técnicas utilizadas para la implementación del RAP dependen principalmente de la temperatura de aplicación del material reciclado, las cuales se dividen en mezclas de reciclaje en frío, en tibio o en caliente.

En lo referente al reciclaje en frío, el material recuperado (RAP) generalmente se utiliza en la capa de base hidráulica mediante el uso de un agente estabilizador, siendo los agentes más utilizados la emulsión asfáltica o el asfalto espumado.

Estas tecnologías de estabilización permiten reutilizar el material RAP existente ya sea en sitio o en planta, lo que se traduce en una disminución principalmente de los costos energéticos y las emisiones al medio ambiente —al ser un método de estabilización en frío—, así como en una reducción en el consumo de material pétreo y asfáltico virgen, al aprovecharse el material existente en el pavimento, además de la posibilidad de acortar los tiempos de ejecución de obras debido a que son procesos rápidos en comparación con otras metodologías.

En años recientes la tecnología del asfalto espumado ha cobrado auge principalmente en países europeos, al reducir la cantidad de asfalto requerida para estabilizar y potencializar los materiales existentes para la construcción de carreteras, además de los ahorros energéticos y económicos generados mencionados con anterioridad. Sin embargo, aun cuando el diseño que da cabida a la adopción de esta metodología se encuentra estipulado en el manual de diseño *Wirtgen Cold Recycling Technology*, existe la incertidumbre de si los parámetros establecidos son los adecuados para aceptar o descartar el diseño realizado, más aún al proponer un material con variabilidad alta como lo es el RAP.

Dentro del diseño de una estabilización con asfalto espumado, por un lado, se encuentra el análisis y aceptación del asfalto a utilizar, así como la aceptación de la espuma de asfalto obtenida. Por otro lado, se define una estructura granulométrica adecuada, la cual establecerá en gran parte el contenido de material reciclado a utilizar, para finalmente evaluar mediante ensayos mecánicos la mezcla de

materiales seleccionada, y así conocer el aporte del asfalto espumado a la base hidráulica estabilizada.

Este trabajo se enfoca en la utilización de asfalto espumado, debido a que es una de las técnicas utilizadas de reciclaje en frío en México para la estabilización de bases hidráulicas con material reciclado. Aunque esta solución se ha adoptado en diferentes obras importantes, en la actualidad no existen registros de las propiedades mecánicas resultantes de la aplicación de esta técnica y los procedimientos de diseño están basados en el *Manual de diseño* de Wirtgen, creador de esta tecnología.

Debido a que esta técnica está siendo utilizada de manera continua en México, es indispensable definir procedimientos de diseño y realizar una evaluación de las propiedades mecánicas de una base estabilizada con asfalto espumado incorporando material reciclado, así como la determinación de los valores de referencia para el diseño estructural de un pavimento con este tipo de estabilización, como es el valor de módulo de resiliencia.

1 Revisión bibliográfica

1.1 Reciclaje de Pavimentos

Dentro de la historia del reciclaje, es importante mencionar que reciclar el pavimento no es algo novedoso, debido a que existen indicios del reciclaje de pavimento asfáltico cerca del año 1900 (Izaks, Haritonovs y Zaumanis, 2015). De la misma manera, hacia los años de 1970, durante la crisis petrolera (Newcomb, Brown y Epps, 2007), surgió la necesidad de reciclar los pavimentos asfálticos debido a los altos costos del petróleo, aunque en ese entonces existía poca experiencia del diseño de pavimentos reciclados y su tecnología ni se conocían procedimientos constructivos aptos para su reaprovechamiento, ya que prácticamente las mezclas recicladas se consideraban solo experimentales o desconocidas.

Es por ello que, al implementar el uso del material RAP, es posible reutilizar la capa de rodadura e incluso los materiales existentes en la estructura de pavimento, lo que representa economía en el mantenimiento y rehabilitación de los pavimentos en servicio. Por ende, se reducen los acarrees, costos por explotación de bancos de materiales y recursos naturales, lo cual concuerda con lo mencionado por Newcomb, Brown y Epps (2007) donde señalan que los dos factores principales que influyen para utilizar el RAP son los ahorros económicos y los beneficios ambientales.

Con base en lo anterior, cada vez se incursiona más en dicha alternativa de reciclaje en diferentes países, e incluso ha alcanzado un considerable impulso por la Asociación Europea de Pavimentación Asfáltica (EAPA, 2016), por el hecho de implementar materiales reciclados como un factor en favor del medio ambiente del que se ha ido cobrando conciencia en los últimos años. De la misma manera, la Administración Federal de Carreteras (*Federal Highways Administration*) de Estados Unidos (Aschenbrener, 2013) describe en una de sus conferencias que el reciclaje de pavimento propicia una mejora ambiental-económica-ingenieril (AEI) — tal como lo muestra la Figura 1.1 es decir, las 3E (del inglés: *Environmental, Economic, Engineering*).

Cabe señalar, además, que, al utilizar materiales reciclados de la estructura de pavimentos, se abre un amplio abanico de posibilidades para su aprovechamiento, los cuales van de acuerdo con la aplicación o el diseño final del material recuperado. Éstos pueden clasificarse de acuerdo con su temperatura (es decir, pueden reciclarse en frío o en caliente), y el proceso de reciclaje puede tener lugar en planta o en sitio.

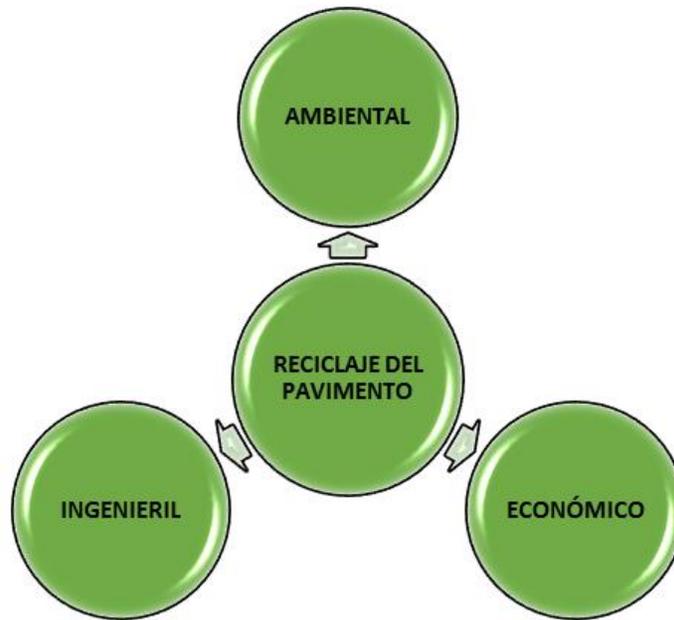


Figura 1.1 AEI del reciclaje

De esta manera, es posible añadir un cierto porcentaje de RAP para producir una nueva mezcla asfáltica en caliente (*Hot Mix Asphalt*, HMA), la cual se utilizará como una carpeta asfáltica con capacidad estructural.

- En el proceso de **reciclaje en caliente en sitio** se utiliza una fuente de calor, la cual reblandece el pavimento asfáltico, permitiendo escarificar el material y realizar un procedimiento de remezclado en sitio con aditivos o material pétreo de aporte. Por el tipo de aplicación, este procedimiento se considera como **tratamiento de espera**, ya que la vida útil del pavimento será de aproximadamente de tres años, siendo las ventajas principales el tiempo de ejecución y que se puede reutilizar hasta el 100% del material reciclado.
- En el **reciclaje en caliente en planta**, el RAP se obtiene en frío mediante el fresado de la carpeta asfáltica. Este material se analiza en el laboratorio y, de acuerdo con las propiedades físicas del material, así como de las características de las plantas de asfalto, se define el porcentaje óptimo de material reciclado a utilizar: los porcentajes van del 10 al 50% de material reciclado. Para porcentajes de RAP de hasta 20%, no se requieren estudios especializados en el diseño, ya que el comportamiento mecánico dependerá del material de aporte (material pétreo y asfáltico virgen). La utilización correcta de porcentajes altos de RAP requiere de la utilización de aditivos rejuvenecedores (evaluación reológica del asfalto), ensayos de laboratorio especializados (ensayos de fatiga o mecánica de fractura), así como de una planta adecuada para este propósito (al menos cuatro tolvas o gravimétrica, calentamiento por convección o contraflujo). Bajo las condiciones antes descritas, la vida útil del pavimento deberá ser de al menos 15 años y con prestaciones mecánicas similares a las de un pavimento nuevo.

Durante las últimas dos décadas el reciclaje en frío ha aumentado como una de las técnicas rentables para reducir la huella de carbono en las carreteras, debido a que el reciclaje en frío, mediante la estabilización de la base hidráulica con asfalto, ofrece una solución eficiente y económica para la rehabilitación de los pavimentos.

En estas aplicaciones, el material reciclado puede utilizarse solo o en una combinación de material estructural recuperado como es la base hidráulica, con lo que se busca obtener una base hidráulica estabilizada. Además, se trata de un proceso de bajo costo, en comparación con el reciclaje en caliente (HMA, por sus siglas en inglés), principalmente por el hecho de que no requiere de altas temperaturas para reprocesar los materiales reduciendo las emisiones de gases efecto invernadero. Cabe precisarse que los porcentajes de material reciclado susceptibles de utilizarse son superiores al obtenido mediante un proceso de reciclaje en caliente.

La técnica más utilizada en este tipo de aplicación es la recuperación profunda o *Full-Depth Reclamation* (FDR), que consiste en una técnica de reciclaje en la cual toda la carpeta asfáltica existente y la totalidad o una porción de la capa inferior (base hidráulica) son retiradas del pavimento, para luego procesar el material y producir una base bien compactada. En los casos de reciclaje en frío en sitio, se reducen los costos de transporte, debido a que el material reciclado se reutiliza en el lugar y se elimina la necesidad de transportar material nuevo.

El primer estudio realizado a gran escala se llevó a cabo en Sudáfrica hacia el año 2000, y se utilizó un simulador de vehículos pesados (*Heavy Vehicle Simulator*, HVS), sobre una estabilización de pavimentos reciclados en combinación con asfalto espumado.

A partir de dicha investigación se elaboró la *Guía técnica provisional sudafricana* (TG2) para el diseño y uso de materiales tratados con asfalto espumado y emulsiones asfálticas (Asphalt Academy, 2009). Esta guía se ha ido complementando y actualizando, como es el caso con el Manual de diseño de Wirtgen (2012). En México, se incursiona con dicha tecnología a partir de la primera guía señalada. Sin embargo, hasta el momento no se cuenta con la normativa correspondiente que regule dicho diseño o procedimiento constructivo.

1.2 Normativa mexicana

La Normativa Mexicana de Materiales de Subbases y Bases para Pavimentos N-CMT-4-02-003/16, "Materiales para Bases Tratadas", detalla los requisitos de calidad necesarios para el tratamiento de bases de pavimentos asfálticos y pavimentos de concreto hidráulicos. Dicha normativa se centra en utilizar aquellos materiales que no cumplieron con los parámetros establecidos en la Norma N-CMT-4-02-002/04, mediante la incorporación de algún producto adicional que modifique alguna de sus características físicas, generalmente haciéndolos más rígidos y resistentes.

Dentro de este ramo se encuentra la clasificación “Apéndice F: Requisitos de calidad de materiales para base de mezclas asfáltica (Base Negra) provenientes de un banco”. El cual describe de manera general los requerimientos que debe cumplir la mezcla estabilizada con un ligante asfáltico (en caliente o en frío). El apéndice H de esta misma norma hace mención a los requisitos de calidad de materiales provenientes de la recuperación de pavimentos existentes, sin embargo, no presenta ningún requerimiento para su utilización.

Lo que se puede concluir es que esta Normativa no contempla el uso de otras técnicas de estabilización con asfalto como puede ser la tecnología denominada Asfalto Espumado, ni tampoco contempla una metodología para la utilización de materiales recuperados (RAP).

Por lo cual es indispensable validar la metodología de diseño descrita en el manual de reciclaje en frío de Wirtgen (Wirtgen Cold Recycling Technology 2012) y realizar evaluaciones del comportamiento mecánico de este tipo de estabilizaciones.

1.3 Asfalto espumado

La tecnología de asfalto espumado consiste en inyectar una pequeña cantidad de agua fría con aire comprimido sobre asfalto caliente, proceso que se lleva a cabo en una cámara de expansión (Figura 1.2), diseñada específicamente para este propósito (Abdullah y Al-Abdul, 2015).



Figura 1.2 Cámara de expansión para asfalto espumado

Al encontrarse el asfalto en forma de espuma, se obtiene un estado temporal de baja viscosidad, y por ende, puede agregarse y mezclarse con materiales a temperatura ambiente.

Para producir asfalto espumado —además de requerir ajustes de parámetros tales como la temperatura del asfalto, la cantidad y naturaleza del agua—, también se requiere regular las condiciones en las que se recolecta la espuma. Con ese propósito, se utilizan dos parámetros en esta selección, a saber: la razón de expansión (Re) y la vida media ($\tau_{1/2}$), los cuales dependen de la temperatura y la forma del recipiente en donde se recolecta la espuma.

- **Re** = Representa el volumen de espuma expandido, dividido entre el volumen de asfalto original, y se mide como la altura de la espuma en función del tiempo.
- $\tau_{1/2}$ = Equivale al tiempo transcurrido en que la altura de la espuma disminuye a la mitad de su valor máximo.

Al obtener una relación de expansión mayor, es posible alcanzar una mayor área de contacto para revestir los agregados, mientras que una vida media más larga favorecerá una viscosidad más baja y, por consiguiente, se asegura una suficiente trabajabilidad de la mezcla (Ozturk y Kutay, 2013).

En relación con el posible envejecimiento del asfalto por el proceso de espumado, Lesueur *et al.* (2004) caracterizaron asfaltos mediante ensayos de laboratorio: penetración (ASTM D5 / D5M - 13); punto de reblandecimiento por anillo y bola (ASTM D36 / D36M - 09); espectrometría infrarroja con transformada de Fourier (ASTM D6348 - 12e1), conocida también como “FTIR”; calorimetría diferencial de barrido (DSC, del inglés: *differential scanning calorimetry*) (ASTM D3418-15), y cromatografía de gases en columnas no polares o destilación simulada (*simulated distillation*, SD). La conclusión apunta a que se presenta un ligero endurecimiento en el asfalto por el proceso de espumado sin afectar el comportamiento reológico del asfalto. Adicionalmente, se demostró que la composición del asfalto no influye en forma considerable en las propiedades espumantes, ya que los resultados de dicha investigación muestran que la espuma se forma de manera similar, sin importar el origen del asfalto, con lo que se concluye que es el mismo fenómeno físico el responsable de la formación de la espuma y no las propiedades del asfalto.

La mezcla de asfalto espumado funciona encapsulando y uniendo las pequeñas partículas finas, las que, en conjunto con los agregados, trabajan como pequeños puntos de soldadura (Wirtgen, 2012). Ello se traduce en una mezcla rígida propia por el agregado y flexible por los ahora nuevos puntos de soldadura de asfalto.

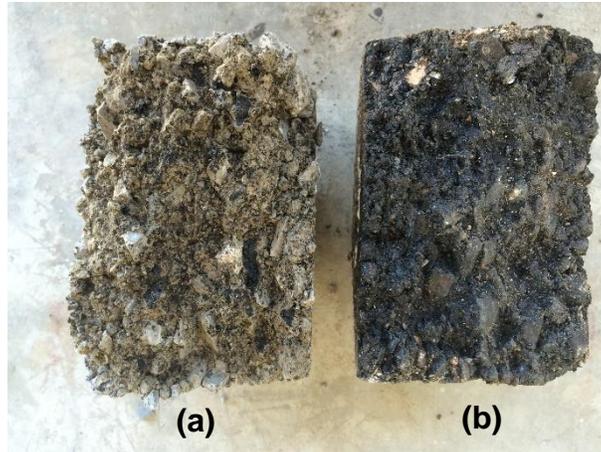


Figura 1.3 Comparación de una probeta de base estabilizada con asfalto espumado (a) vs mezcla asfáltica (b)

Al analizar la unión de mezcla asfáltica, el agregado se encuentra completamente cubierto por una capa de asfalto, a diferencia del anterior donde el asfalto espumado produce una unión discontinua.



Figura 1.4 Material granular (a) no unido, (b) unión continua, (c) unión discontinua

Entre las principales consideraciones para la realización de una base estabilizada con asfalto espumado, se observa lo siguiente:

- El asfalto espumado se distribuye principalmente hacia las partículas finas, por lo que el contenido de asfalto, en general, se utiliza en el rango del 2 al 5% y se encuentra en función del contenido de finos del material a estabilizar (Saleh, 2007).
- Una cantidad elevada de asfalto propicia una mayor flexibilidad en las mezclas, pero una menor resistencia a la deformación permanente (Jenkins, Long y Ebels, 2007).
- Los finos son necesarios para una mejor dispersión en una estabilización con asfalto espumado; sin embargo, el exceso reduce la permeabilidad y la capacidad de drenaje, lo que, a su vez, disminuye las propiedades de una base hidráulica (Dal Ben y Jenkins, 2014).
- Uno de los beneficios obtenidos al estabilizar los materiales granulares con asfalto espumado es un aumento en las propiedades cortantes del material,

como la cohesión (C), sin que el ángulo de fricción (ϕ) se vea modificado significativamente (Wirtgen, 2016).

- Analizando los valores de ITS (secos y saturados) de un material de base granular, se concluyó que, al incrementar el contenido de asfalto espumado, la mezcla es menos susceptible a la humedad (Marek y Anna, 2013).
- Al producir una mezcla estabilizada con asfalto espumado, es crucial vigilar los contenidos de humedad de los materiales, ya que los agregados húmedos propician una inadecuada dispersión del asfalto y, por consiguiente, una mala unión de éstos, lo que conlleva a un impacto en cuanto al daño inducido por humedad, así como a una menor durabilidad a largo plazo (Abbas *et al.*, 2013).

2 Metodología

La tecnología de asfalto espumado tiene como propósito construir una base estabilizada de alta calidad mediante la reutilización de materiales existentes en la estructura del pavimento a rehabilitar. Con ello se obtiene una base granular con unión discontinua, con mejor cohesión y susceptibilidad a la humedad, al mismo tiempo que se mantiene el ángulo de fricción interna de la base hidráulica.

De acuerdo con la metodología existente por parte de la TG2 (Asphalt Academy, 2009) y el *Manual de reciclaje* de Wirtgen (2012), para el diseño de una base estabilizada con asfalto espumado, se deben tener en cuenta las diferentes etapas de análisis (Figura 2.1):

- Caracterización de los materiales a utilizar (material pétreo, asfáltico y RAP)
- Determinación de la granulometría de diseño
- Determinación de las propiedades espumantes del asfalto
- Diseño de la mezcla de materiales (fórmula de trabajo)
 - Nivel 1: Determinación de la necesidad de “*filler* Activo”
 - Nivel 2: Determinación del contenido óptimo de asfalto espumado
 - Nivel 3: Determinación de las propiedades mecánicas



Figura 2.1 Elementos fundamentales para el diseño de una base estabilizada con asfalto espumado

Es importante señalar que los materiales utilizados en la estructura de pavimentos tienen un comportamiento acorde con su naturaleza, así como con el tratamiento, la estabilización o la incorporación de material adicional. Es decir, si a éstos se les ha añadido cierta cantidad de cemento o asfalto, variará entonces el comportamiento de éste, para ser más rígido o flexible. Tal es el caso de la Figura 2.2 mostrada a continuación.

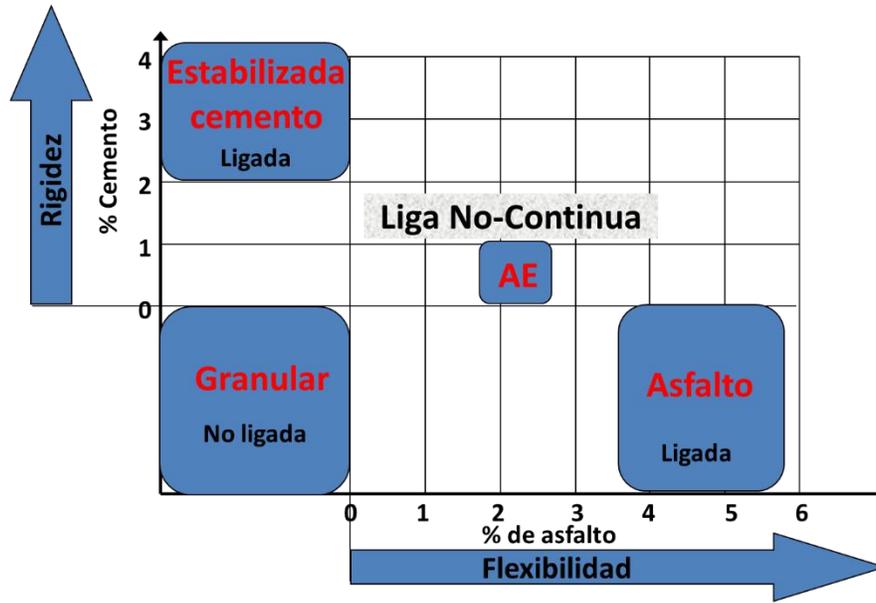


Figura 2.2 Comportamiento de los materiales en un pavimento

Por otro lado, para simplificación de los puntos mostrados anteriormente, se presenta un diagrama de flujo con base en la metodología del manual Wirtgen (2012), el cual se puede apreciar en la Figura 2.3.

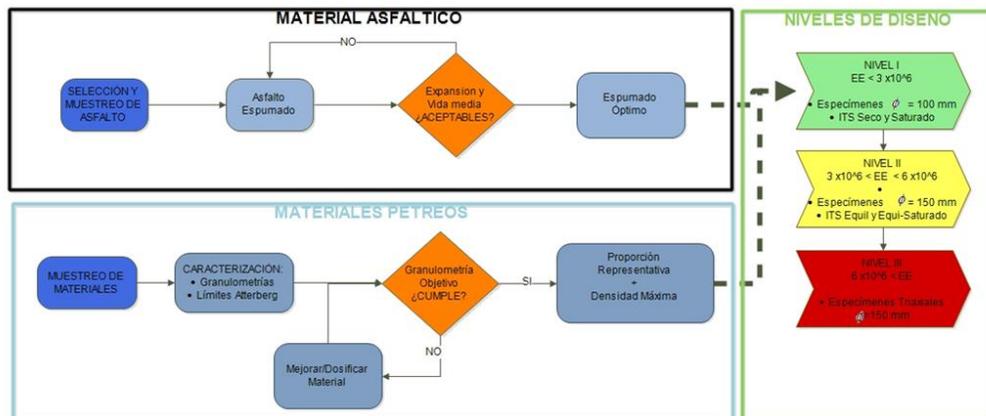


Figura 2.3 Diagrama de flujo para el diseño de una base estabilizada con asfalto espumado

No obstante, a pesar de la metodología existente, se pretende complementar el proceso de diseño disponible con un indicador de diseño adicional, ya que, además de analizar el comportamiento mecánico del material mediante una prueba estática (triaxial), es importante conocer el comportamiento mecánico mediante una prueba dinámica (triaxial cíclica). De esta manera, será posible predecir el comportamiento del material estabilizado frente a las cargas cíclicas aplicadas en el pavimento, es decir que, para un análisis de diseño de pavimentos sea posible contemplar y conocer el comportamiento del material mediante el parámetro de módulo de

resiliencia. A continuación, se muestra el diagrama con la metodología propuesta (véase la Figura 2.4)

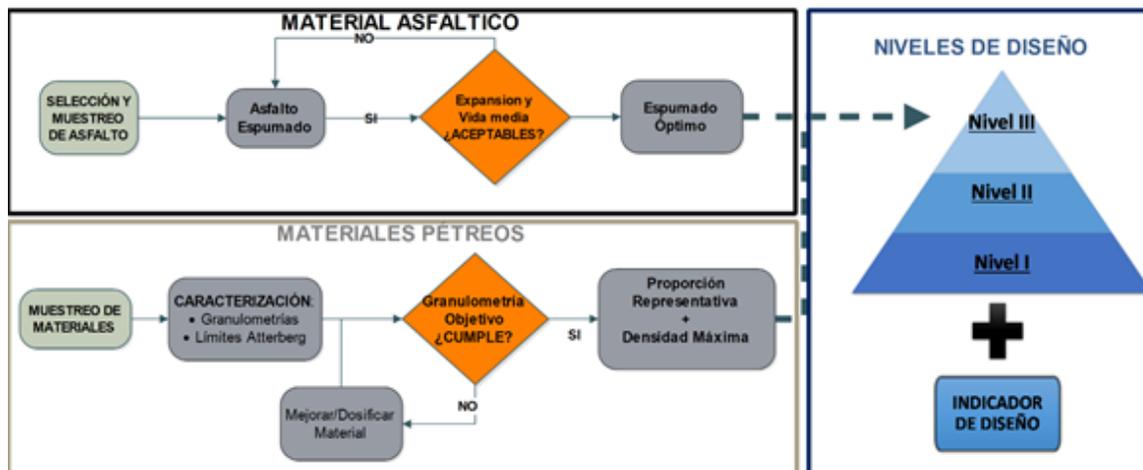


Figura 2.4 Propuesta de diseño para una base estabilizada con asfalto espumado aplicable en México.

2.1 Caracterización de materiales

El presente inciso presenta los diferentes ensayos a realizar para la caracterización de los materiales que se van a utilizar en el diseño de las bases estabilizadas con asfalto espumado.

2.1.1 Material asfáltico

El material asfáltico puede clasificarse mediante dos metodologías: ya sea por medio de viscosidad o por su grado PG. Sin importar la metodología seleccionada, se debe tener en cuenta que para la elaboración del asfalto espumado no se pueden utilizar asfaltos modificados, ya que éstos imposibilitan crear una espuma lo suficientemente constante debido a la obstrucción de las líneas de conducción, así como boquillas en la máquina de espumado, además de que se requiere una mayor temperatura para poder crear la espuma.

2.1.1.1 Grado PG y resultados

En el presente estudio, se lleva a cabo la clasificación del ligante asfáltico mediante la metodología del grado PG (del inglés: *Performance Graded*), conocido en México como “grado de desempeño del asfalto”, lo anterior con base en la norma estadounidense ASTM D6373-13 y la norma mexicana N-CMT-4-05-004/05. El propósito de conocer el grado PG en la presente investigación es acreditar que el asfalto AC-20 producido por Petróleos Mexicanos (Pemex) sea un asfalto blando (viscoso a baja temperatura), y no uno modificado (regularmente viscoso a alta temperatura), y que, además, pueda utilizarse como un asfalto idóneo para la estabilización con asfalto espumado.

Con apego a la normativa mexicana, se debe analizar el rango de temperaturas a las cuales el cemento asfáltico se desempeña satisfactoriamente, que le permita utilizarse en una región del país en específico donde se conozcan los rangos de operación del pavimento. Tal es el caso de los grados PG necesarios: para la capa de rodadura pueden ser tantos y tan amplios como la gama de temperatura registrada en el territorio mexicano (N-CMT-4-05-004/05, 2005) (véase la Figura 3.5, producto de la normativa N-CMT-4-05-004/05). A partir de dicha figura, es posible realizar ajustes de grado PG por clima, en función de la intensidad de tránsito esperada y la velocidad de operación (véase la Tabla 2.1, también procedente de la misma normativa).



Figura 2.5 Regiones geográficas para la utilización recomendable de cementos asfálticos grado PG

Por lo anterior, el uso de asfaltos con diferentes grados de desempeño es necesario a lo largo del territorio mexicano. Sin embargo, es importante mencionar que los asfaltos producto de la refinación de Pemex se clasifican como PG 64 -16 o 64 -22, por lo que para aumentar su grado PG, es necesario añadir un aditivo o polímero, lo que los convierte entonces en “asfaltos modificados”.

Tabla 2.1 Ajustes de grado PG en el territorio mexicano

Intensidad del tránsito (ΣL_{10}) ^[1]	Grado PG seleccionado por clima	Ajuste por intensidad del tránsito	Ajuste por velocidad lenta (entre 10 y 30 km/h)	Ajuste por tránsito detenido (cruceos)
$\Sigma L_{10} < 10^6$	PG 64	PG 64	PG 70	PG 76
	PG 70	PG 70	PG 76	PG 82
	PG 76	PG 76	PG 82	PG 88
$10^6 \leq \Sigma L_{10} \leq 10^7$	PG 64	PG 70	PG 76	PG 82
	PG 70	PG 76	PG 82	PG 88
	PG 76	PG 82	PG 88	PG 88
$\Sigma L_{10} > 10^7$	PG 64	PG 76	PG 82	PG 88
	PG 70	PG 82	PG 88	PG 88
	PG 76	PG 88	PG 88	PG 88

[1] ΣL_{10} = Número de ejes equivalentes de 8.2 t (ESAL) esperado a lo largo de un periodo de servicio del pavimento de 10 años.

En el caso del asfalto espumado, se requiere un asfalto capaz de producir una espuma adecuada, independientemente de su grado PG. Las variaciones en el asfalto de base utilizado darán como resultado diferentes contenidos de agua y temperaturas para obtener la condición óptima de espumado.

2.1.2 Material pétreo y RAP

Después de haber realizado el muestreo del material a utilizar, se requiere determinar dos características físicas: la granulometría y la plasticidad. La Tabla 2.6 presenta el diagrama de flujo de esta etapa del diseño.



Figura 2. 6 Diagrama de flujo para materiales pétreos

2.1.2.1 Plasticidad de los materiales

La plasticidad de los materiales se determina con base en la Norma “Límites de consistencia” (M-MMP-1-07/07) (véase la Figura 2.7). Además de conocer la plasticidad de los materiales, esta prueba tiene como objetivo determinar — mediante el valor del índice plástico (IP)— la necesidad de realizar un pretratamiento al material pétreo (Tabla 2.2). Cabe precisar que este ensayo solo se realiza al material pétreo.

Tabla 2.2 Determinación de pretratamiento con *filler*.

ÍNDICE PLÁSTICO < 10	ÍNDICE PLÁSTICO > 10
Llevar a cabo pruebas con especímenes de 100 mm de diámetro para determinar la necesidad de añadir cemento o cal hidratada.	Pretratamiento del material con cal hidratada (el consumo inicial de cal [CIC] se debe determinar primero mediante la prueba de pH apropiada).



Figura 2.7 Ejecución de ensayo de límites de consistencia

2.1.2.2 Granulometría

Para la realización del ensayo de granulometría, se realiza una homogeneización del material, así como la reducción de las muestras, de acuerdo con lo descrito en la norma “Práctica normativa para reducir las muestras de agregados a tamaño de prueba” (ASTM C702 / C702M - 11).

La ejecución del ensayo granulométrico se realiza con una variación del “Método de prueba estándar para análisis granulométrico de materiales pétreos finos y gruesos” (ASTM C136 / C136M - 14). Este ensayo se realiza tanto al material pétreo como al material de RAP (véase la Figura 2.8)



Figura 2.8 Tamices y mallas para el ensayo granulométrico

2.2 Granulometría de diseño

Uno de los puntos fundamentales en el diseño de la base estabilizada con asfalto espumado es el ajuste de la estructura granulométrica de mezcla de los materiales. La Figura 2.10 muestra los límites granulométricos requeridos para las bases estabilizadas con asfalto espumado. Este criterio generalmente define el máximo

porcentaje de RAP a utilizar en la mezcla de materiales. La Tabla 2.3 presenta los límites granulométricos para abertura de malla.

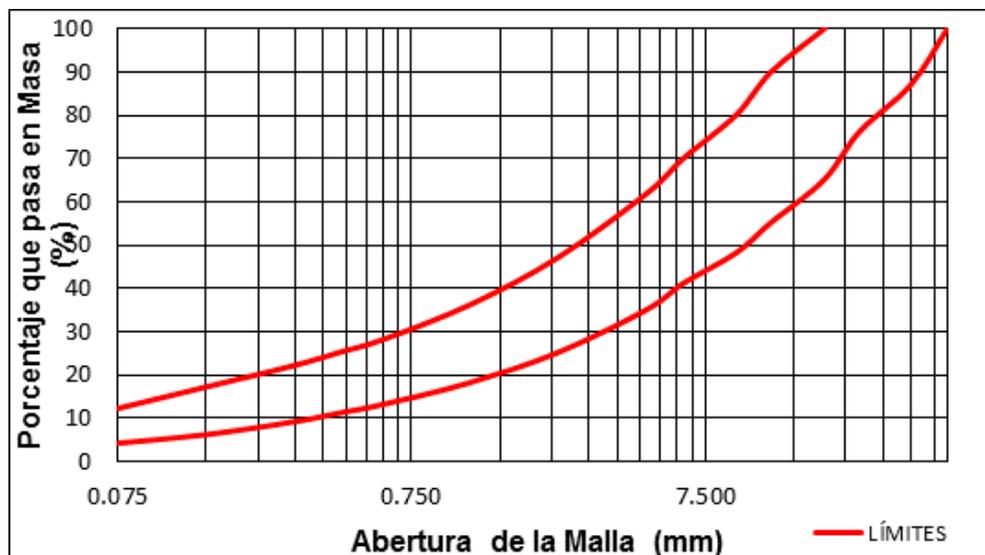


Figura 2.9 Límites granulométricos para bases espumadas

Tabla 2.3 Valores límite para curvas granulométricas

Abertura de malla		Límite superior (%)	Límite inferior (%)
in	mm		
2"	50.00	100	100
1 1/2"	37.50	100	87
1"	25.00	100	76
3/4"	19.00	100	65
1/2"	12.50	90	55
3/8"	9.50	80	48
1/4"	6.30	70	41
N°4	4.75	62	35
8	2.360	47	25
16	1.180	36	18
30	0.600	28	13
40	0.425	25	11
50	0.300	22	9
100	0.150	17	6
200	0.075	12	4

2.2.1 Densidad seca máxima

Una vez definida la granulometría de la mezcla de materiales, se determina el peso volumétrico seco máximo (PVSM), conocido también como γ_d . Esta determinación se realiza con apego a la norma SCT M-MMP-1-09/06 (2006), en su variante "D". Este ensayo permitirá obtener dos parámetros de diseño: contenido de humedad óptima y densidad seca máxima. La compactación se realiza en cinco (5) capas, aplicando cincuenta y seis (56) golpes por capa, con un pisón de 4.54 kg en un molde de 152.4 mm de diámetro interior



Figura 2.10 Molde para variante tipo "D"

Para cada una de las mezclas, se requiere elaborar cuatro puntos con diferentes contenidos de humedad, de los cuales se pretende tener dos puntos antes y dos puntos después del contenido de humedad óptima.

2.2.2 Proporción representativa

Uno de los criterios a tomar en consideración para la dosificación de la mezcla de materiales en laboratorio es el tamaño máximo del agregado. La metodología de diseño para asfalto espumado considera que, sin importar el nivel del tránsito, no se deben utilizar partículas mayores a 3/4", mismas que deben retirarse y compensarse con el material restante, con lo que se genera una proporción representativa del material.

A fin de generar dicha proporción representativa, se requiere separar el material de la muestra en las siguientes fracciones:

- Cantidad retenida en la malla: 19 mm
- Cantidad que pasa: 19 mm - cantidad retenida: 12.5 mm
- Cantidad que pasa: 12.5 mm - cantidad retenida: 4.75 m
- Cantidad que pasa: 4.75 mm

- Se sustituye la proporción retenida en la malla (19 mm) con material que pase la malla (19 mm), y se retienen en la malla 12.5 mm. El ejemplo en la Tabla 2.4 explica el procedimiento:

Tabla 2.4 Elaboración de proporción representativa

Análisis de malla		Cantidad de material a ser incluido por cada 10 kg de muestra		
Tamaño de malla (mm)	Porcentaje que pasa	Pasan 19 mm y se retienen 12.5 mm	Pasan 12.5 mm y se retienen 4.75 mm	Pasan 4.75 mm
19	90.5	$\frac{(100-72.3)}{100} \times 10,000$ $= 2,770 \text{ g}$	$\frac{(72.3-53.6)}{100} \times 10,000$ $= 1,870 \text{ g}$	$\frac{53.6}{100} \times 10,000$ $= 5,360 \text{ g}$
12.5	72.3			
4.75	53.6			

2.3 Propiedades espumantes del asfalto

Adicional a la caracterización del ligante asfáltico, se deben determinar las sus propiedades espumantes. Esta determinación se realiza en el equipo de espumado de laboratorio WLB-10S (figura 2.11). El proceso para realizar esta determinación se presenta en el diagrama de la 2.12.



Figura 2.11 Equipo de laboratorio Wirtgen WLB-10S

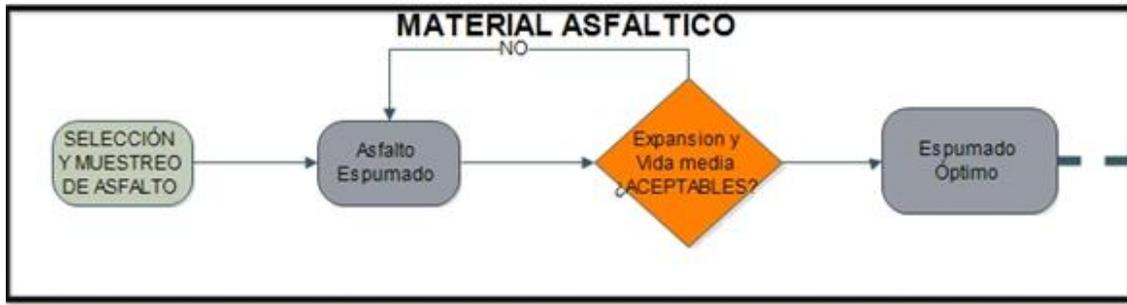


Figura 2.12 Diagrama de flujo de análisis para el material asfáltico

Las propiedades espumantes del asfalto Re y $\tau_{1/2}$ se determinan al utilizar una varilla estandarizada y un recipiente (véase la Figura 2.13), precalentado a $75\text{ }^{\circ}\text{C}$, dentro del cual se procede a descargar el asfalto espumado.



Figura 2.13 Recipiente y varilla estandarizada para medir la expansión del asfalto espumado

Posteriormente, se analiza el volumen expandido y su consecuente colapso dentro del recipiente conforme transcurre el tiempo (véase la Figura 2.14).

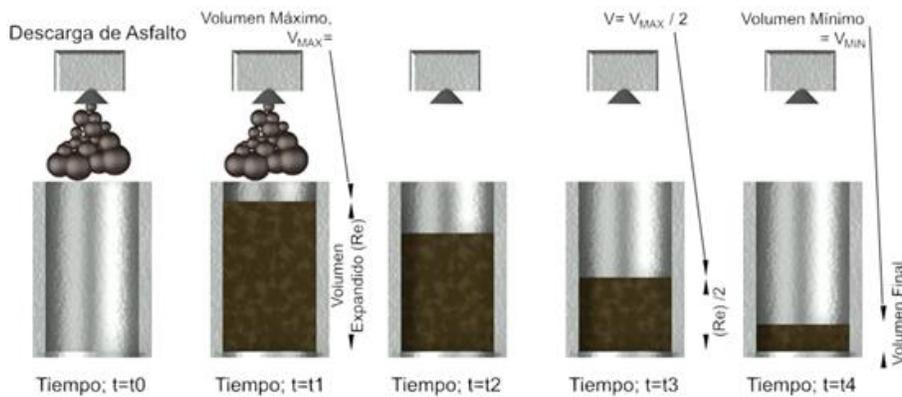


Figura 2.14 Medición de propiedades espumantes del asfalto espumado

La descarga del asfalto se puede apreciar entre el tiempo $t=0$ y $t=1$. En el tiempo $t=2$, el asfalto espumado comienza a colapsar, y es hasta el tiempo $t=3$ cuando el volumen máximo se encuentra a la mitad, es decir que, al momento de registrar el tiempo, es posible conocer la vida media $\tau_{1/2}$; posteriormente, en el tiempo $t=4$, el volumen final de asfalto espumado ha colapsado por completo.

- Relación de expansión (Re)

Una medida de la viscosidad del asfalto espumado, calculado como la proporción máxima del volumen de la espuma respecto del volumen original del asfalto.

- Vida media ($\tau_{1/2}$)

Una medida de la estabilidad del asfalto espumado, calculado como el tiempo tomado en segundos por la espuma en colapsar a la mitad de su volumen máximo.

Los parámetros mencionados anteriormente, se calculan a tres diferentes temperaturas sin exceder los $195\text{ }^{\circ}\text{C}$, y en cada caso se realiza con tres diferentes contenidos de agua. Cabe mencionar que el equipo Wirtgen WLB-10S cuenta con un panel de control capaz de ajustar dicha temperatura. Así también dentro del mismo panel de control, se ingresa el porcentaje de agua a inyectar, el cual el equipo convierte en el caudal o la columna de agua requeridos según sea la velocidad de inyección del asfalto. A continuación, dicha columna se ajusta manualmente en el medidor de flujo mediante una perilla mecánica (véase la Figura 2.15).



Figura 2.15 Ajuste del fluxómetro en el equipo WLB-30S

2.3.1 Determinación de espumado óptimo

El criterio que se utiliza para seleccionar la mejor espuma obtenida es seleccionar la mejor relación de expansión Re , con una mejor vida media $\tau_{1/2}$, donde los parámetros de aceptación mínima, que se encuentran establecidos en el Manual *Wirtgen Cold Recycling Technology* (Wirtgen, 2012), corresponden a los que se muestran en la Tabla 2.5

Tabla 2.5 Límites mínimos para asfalto espumado

Características de asfalto espumado (límites mínimos)		
Temperatura de agregado	10 – 15 °C	> 15 °C
Razón de expansión (veces)	10	8
Vida media (seg)	8	6

Para encontrar los valores de Re y $\tau_{1/2}$, se requiere realizar un barrido de por lo menos tres temperaturas (160, 170 y 180 °C), añadiéndose tres diferentes contenidos de agua (2, 3 y 4%) a cada una de ellas, en conformidad con recomendaciones previstas en la literatura técnica (Wirtgen, 2012).

2.4 Diseño de la mezcla de materiales (fórmula de trabajo)

La metodología para el diseño de la base estabilizada con asfalto espumado considera tres niveles de diseño, los cuales están definidos de acuerdo con el tránsito al cual va a estar sometido el pavimento asfáltico. Éstos se describen a continuación:

Nivel I: Necesidad de *filler* activo. El presente nivel de diseño tiene como objetivo establecer si la mezcla de materiales (base hidráulica - RAP) necesita la inclusión de un *filler* activo. Para esta determinación se realizará un ensayo de susceptibilidad a la humedad mediante el ensayo de relación de resistencia a la tensión o TSR (del inglés: *Tensile Strength Ratio*). Los dos *filler* activos utilizados para este tipo de material son la cal y el cemento Portland en porcentajes de 1%, para lo cual se realiza una evaluación con cada una de las tres variables: sin *filler*, con 1% de cal y 1% de cemento.

Nivel II: Determinación del contenido de asfalto espumado. En este nivel, se pretende determinar el contenido óptimo de asfalto espumado que requiere el material. Una vez seleccionada una de las tres variantes analizadas en el nivel I, se realiza un barrido de contenidos de asfalto espumado (cuatro porcentajes), con lo que se logra determinar el mejor desempeño mediante el ensayo de susceptibilidad a la humedad. Los rangos de contenido de asfalto espumado varían de acuerdo con los materiales utilizados, el porcentaje de RAP y las características de compactación de las mezclas de materiales. En general, los contenidos se encuentran en un rango de 2.0 a 3.0%. Después de esta evaluación, se tendrá determinada la mezcla de materiales (fórmula de trabajo).

Nivel III: Propiedades mecánicas. Este nivel tiene como objetivo evaluar las propiedades mecánicas de la mezcla de materiales definida en los dos niveles previos. Los parámetros a evaluar son el valor de cohesión y el ángulo de fricción interna, que se determina mediante un ensayo triaxial.

INDICADOR DE DISEÑO ESTRUCTURAL: Con el objetivo de incorporar los resultados obtenidos a un método de diseño estructural de pavimentos, se propone la inclusión de una evaluación adicional, la cual permitirá obtener un indicador de la

capacidad estructural de la nueva base estabilizada. Para ello, se decidió seleccionar el ensayo de módulo de resiliencia, que es el parámetro más utilizado en el diseño de pavimentos. La Figura 2.16 presenta un esquema de la evaluación de los diferentes niveles de diseño propuestos y el nivel de tránsito considerado para cada nivel.



Figura 2.16 Propuesta de los diferentes niveles de diseño para una base estabilizada con asfalto espumado en México

2.4.1 Nivel I. *Filler* activo

El primer punto por verificar es el resultado del ensayo de límites de Atterberg, de acuerdo con la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.:** si el IP es menor que 10, solo se realizarán los ensayos con los *filler* seleccionados (cal cemento) y no será necesario hacer la evaluación de la mezcla sin *filler*.

Para determinar cuál *filler* activo es el indicado, se elaboran especímenes de 100 mm de diámetro y 65 mm de altura, que se someten a ensayos de ITS con el propósito de conocer el valor TSR. Para ello, se requiere elaborar seis especímenes para cada tipo de *filler* a analizar, siendo tres de ellos para condiciones secas y tres para condiciones húmedas, todos incluyendo el mismo porcentaje de asfalto espumado inicial, posible de estimar a partir de la Tabla 2.6

Tabla 2.6 Estimación inicial de asfalto espumado

Fracción que pasa la malla 0.075 mm (%)	Adición de asfalto espumado (% de masa del agregado seco)		Tipo de material típico
	Fracción que pasa la malla 4.75 mm		
	<50%	>50%	
<4	2.0	2.0	Asfalto reciclado (RAP)
4-7	2.2	2.4	RAP/grava triturada/ grava natural/mezclas
7-10	2.4	2.8	
>10	2.6	3.2	Gravas/arenas

Actualmente las pruebas ITS (del inglés: *Indirect Tensile Strength*) se utilizan para conocer el esfuerzo máximo admisible antes de producirse una grieta o falla en los asfaltos espumados. Dichas pruebas también sirven para determinar el daño potencial que pudiera suscitarse ante la presencia de humedad en campo.

El procedimiento requerido para ejecutar el nivel I puede representarse mediante el diagrama en la Figura 2.17, el cual se detalla en los apartados posteriores.

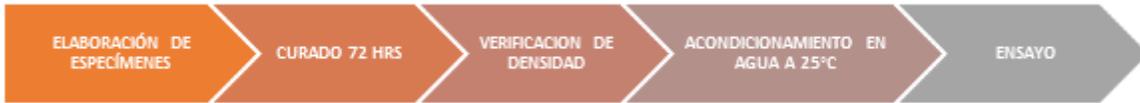


Figura 2.17 Procedimiento de acondicionamiento para ensayo de especímenes nivel I

2.4.1.1 Elaboración de especímenes/densificación

A fin de iniciar el proceso de estabilización con asfalto espumado, se requiere introducir el material a estabilizar en la mezcladora Wirtgen WLM30 (Figura 2.18), junto con la cantidad requerida de *filler* (en caso de ser necesario), donde se mezclan uniformemente durante un minuto. Posteriormente, se enciende de nuevo el equipo añadiendo simultáneamente el agua necesaria para alcanzar el 75% de humedad óptima. Una vez añadida el agua al 75% hasta alcanzar su contenido óptimo, se acciona por última vez la mezcladora para poder así inyectar la espuma requerida para la cantidad de material, y al final se añade el 25% de agua restante, siendo el agua un elemento necesario durante el mezclado para una adecuada dispersión en el agregado, tal como mencionan Fu, Jones, Harvey y Bukhari (2010).



Figura 2.18 Equipo mezclador de doble eje Wirtgen WLM-30

Para densificar el material una vez espumado, usualmente se utiliza la compactación manual (M-MMP-1-09/06, 2006) o la compactación Marshall, ya que ambos procedimientos se pueden llevar a cabo prácticamente en cualquier

laboratorio a nivel internacional. Sin embargo, pueden utilizarse otros instrumentos como:

- a. compactador giratorio
- b. martillo vibratorio
- c. mesa vibratoria

Todos los procesos de densificación mostrados anteriormente son válidos, siempre y cuando se logre alcanzar la densidad requerida, es decir, el 100% de compactación. A continuación, se muestra una tabla con las características de diámetro y altura del espécimen respecto al nivel de diseño I véase la Tabla 2.7.

Tabla 2.7 Características de los especímenes nivel I.

Diámetro del espécimen	Altura del espécimen	Nivel de diseño
100 mm	63.5 mm	Nivel I

Para fines de la presente investigación, se optó por utilizar el equipo compactador giratorio (Figura 2.19).



Figura 2.19 Compactador giratorio SERVOPAC

Es importante señalar que la configuración utilizada para la compactación de probetas en la presente investigación es de 600KPa y 1.25 grados de giros, a 30 RPM, por lo que el número de giros de la compactación se detenía al alcanzar los 63.5 o 95 mm de altura, según el nivel de diseño, es decir se tomó la cantidad de material requerido en función del peso volumétrico húmedo máximo. A continuación, se presentan los especímenes de 4" después de haberse sometido a compactación mediante el compactador giratorio (véase la Figura 2.20).



Figura 2.20 Especímenes nivel I compactados mediante el compactador giratorio

2.4.1.2 Procedimiento de acondicionamiento

El procedimiento de curado que se aplica para el nivel de diseño I tiene como objetivo simular la condición de campo, así como la humedad más desfavorable del material a utilizarse en campo. El primero de ellos es un procedimiento estándar para secar las muestras a masa constante denominado ITSSECO. Para el segundo acondicionamiento de nivel I, se parte de realizar el mismo procedimiento de ITSSECO para posteriormente sumergir el espécimen en agua a 25 °C durante 24 horas. A este proceso de curado se le designa ITSATURADO. Para conocer la terminología y el proceso de acondicionamiento más detallado, consúltese la Tabla 2.8

Tabla 2.8 Procedimiento de acondicionamiento para ITS nivel I.

Terminología	Diámetro de espécimen	Régimen de curado	Contenido de humedad	Diseño
ITSSECO	100 mm	72 horas no selladas (40 °C)	<1%	Nivel I
ITSATURADO		SECO + 24 horas sumergidas (25 °C)	Saturadas	

Para una mejor comprensión de la tabla anterior se anexan las Figuras 2.21 y Figura 2.22, donde se muestran los diferentes acondicionamientos de ITS nivel I.



Figura 2.21 Especímenes ITSSECO



Figura 2.22 Especímenes ITS_{SATURADO}

Cabe señalar que, al realizar el procedimiento de acondicionamiento para ITS, se requiere preparar previamente los especímenes para su posterior ensayo. Dicha preparación consta de calcular la densidad aparente del espécimen (DA), la cual se realiza mediante la Ecuación 3.1. Las mediciones para el nivel I (véase la Figura 2.23) se deben realizar al cumplirse las 72 horas dentro del horno, aunque los especímenes deben pesarse antes de sumergirse en agua.

$$DA_{\text{spec}} = \frac{4 * M_{\text{spec}}}{\pi * d^2 * h} * 1,000,000 \quad \text{Ecuación 3.1}$$

donde:

DA_{sec} = densidad aparente [kg/m³]

M_{sec} = masa del espécimen [g]

h = altura promedio del espécimen [mm]

d = diámetro del espécimen [mm]



Figura 2.23 Mediciones de especímenes para ITS

A fin de conocer el esfuerzo máximo admisible, es necesario determinar la última carga medida antes de la falla, la cual se aplica sobre el diámetro de la probeta (véase la Figura 2.24) a una velocidad de deformación constante de 50.8 mm/min, utilizando la Ecuación 3.2. Cabe mencionar también que se requiere tener control preciso en la temperatura ($25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$) de los especímenes al momento del ensaye. Es decir: después de haberse sacado del horno, se requiere aclimatar las probetas ITS_{SECO} , mientras que para las probetas $\text{ITS}_{\text{SATURADO}}$, se requiere mantener una temperatura constante del agua, y posteriormente secarlas superficialmente.



Figura 2.24 Ensayo de pruebas ITS

$$\text{ITS} = \frac{2 \times P}{\pi \times h \times d} \quad \text{Ecuación 3.2}$$

donde:

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

Se procede, entonces, a realizar los ensayos de ITS_{SECO} e $\text{ITS}_{\text{SATURADO}}$, para posteriormente obtener el valor TSR, el cual corresponde a la relación entre el promedio de los valores de $\text{ITS}_{\text{SATURADO}}$ dividido entre los valores de ITS_{SECO} para un grupo específico de especímenes, expresado en porcentaje mediante la Ecuación 3.3.

$$TSR = \frac{\text{Prom ITS}_{\text{SATURADO}}}{\text{Prom ITS}_{\text{SECO}}} * 100 \quad \text{Ecuación 3.3}$$

donde:

Prom ITS_{SATURADO} = valores ITS saturado promedio [kPa]

Prom ITS_{SECO} = valores ITS seco promedio [kPa]

2.4.1.3 Selección del *filler* activo

Para la selección del *filler* activo, se tienen que realizar dos evaluaciones de resultados. La primera es la resistencia de las probetas en condición seca y húmeda. Para esto, las probetas evaluadas deberán cumplir los valores mínimos presentados en la Tabla 2.9.

Tabla 2.9 Características mínimas de aceptación para especímenes nivel I

Prueba	Diámetro de espécimen	kPa
ITS _{SECO}	100MM	>225
ITS _{SATURADO}	100MM	>100

El segundo criterio es la relación de TSR, descrito a continuación:

SIN FILLER. Cuando la mezcla sin *filler* obtiene un valor TSR > 60%.

FILLER. Cuando la mezcla sin *filler* obtiene un valor TSR < 60%. Se utiliza entonces la mezcla con *filler* que logre un D > 5% respecto a la otra mezcla. En caso de que la diferencia entre ambos sea < 5%, cualquiera de ambos *filler* propuestos es el adecuado.

2.4.2 Nivel II. Contenido óptimo de asfalto espumado

Una vez seleccionado el *filler* activo que brinda el mejor desempeño en la mezcla, se procede a optimizar el contenido óptimo de asfalto espumado, partiendo del punto inicial indicado anteriormente en la Tabla 2.5. Luego se ajustan los valores por encima y por debajo del punto analizado, regularmente en incrementos de 0.2%.

El ensayo a realizar en el nivel II es similar al ensayo de la prueba en el nivel I, debido a que se requiere conocer el esfuerzo máximo admisible antes de producirse una grieta o falla en los asfaltos espumados, aunque en el nivel II se evalúa la influencia del contenido de asfalto espumado y la evaluación se realiza en probetas con dimensiones diferentes a las del nivel I. El proceso se presenta en la Figura 2.25.



Figura 2.25 Procedimiento de acondicionamiento para ensayo de especímenes nivel II

2.4.2.1 Elaboración de especímenes/densificación

La diferencia con respecto al nivel anterior son las dimensiones de los especímenes de ensayo. Las dimensiones se presentan en la Tabla 2.10

Tabla 2.10 Características de los especímenes nivel II.

Diámetro del espécimen	Altura del espécimen	Nivel de diseño
150 mm	95.0 mm	Nivel II

2.4.2.2 Procedimiento de acondicionamiento

El procedimiento de curado para especímenes de nivel II tiene como objetivo simular las condiciones de campo, donde el "contenido de humedad de equilibrio", mismo que equivale a aproximadamente el 50% del contenido de humedad óptimo. A este proceso de deshidratación controlada se le denomina $ITS_{EQUILIBRIO}$. Para el cuarto acondicionamiento de humedad, se realiza el proceso de $ITS_{EQUILIBRIO}$ y posteriormente el material se sumerge en agua durante 24 horas a 25 °C, proceso que se conoce como $ITS_{EQUI-SATURADO}$ (véase la Tabla 2.11).

Tabla 2.11 Procedimiento de curado para ITS nivel II

Terminología	Diámetro de espécimen	Régimen de curado	Contenido de humedad	Diseño
$ITS_{EQUILIBRIO}$	150 mm	24 horas no selladas (40 °C) + 48 horas en bolsa sellada (40 °C)	+/- 50% del contenido de humedad óptimo	Nivel II
$ITS_{EQUI-SATURADO}$		EQUIL +24 horas sumergidas (25 °C)	Semi saturadas	

Para conocer el valor de ITS de las probetas de nivel II —al igual que en el caso anterior (nivel I)—, el ensayo se realiza después de concluirse el acondicionamiento de las probetas y calcularse su DA; es decir, la mitad de ellas se someten a ensayo después de cumplir su régimen de curado en horno (24 horas no selladas + 48 horas selladas) (véase la Figura 2.26). La mitad restante se acondiciona mediante sumersión en agua durante 24 horas a una temperatura de 25 °C (véase la Figura 2.27).



Figura 2.26 Proceso de acondicionamiento ITS_{EQUILIBRIO}



Figura 2.27 Proceso de acondicionamiento ITS_{EQUI-SAT}

2.4.2.3 Selección óptima de asfalto espumado

La forma de evaluar la influencia del contenido de asfalto espumado es similar a la realizada en el nivel I. La única diferencia radica en los valores de resistencia que deben cumplir los especímenes en condición seca y húmeda, los cuales se presentan en la Tabla 2.12.

Tabla 2.12 Parámetros mínimos de diseño nivel II

Prueba	Diámetro de espécimen	kPa
ITS _{EQUILIBRIO}	150 mm	>175
ITS _{EQUI-SATURADO}	150 mm	>100

2.4.3 Nivel III. Determinación de propiedades mecánicas

Una vez determinada la mezcla de materiales de diseño (tipo de *filler* activo y contenido óptimo de asfalto espumado), se requiere evaluar las propiedades mecánicas de esta fórmula de trabajo, la cual se realiza mediante una serie de ensayos triaxiales propuestos por Mulusa (2009). Entiéndase como prueba triaxial (Figura 2.28) una prueba en donde los esfuerzos se miden en tres direcciones mutuamente perpendiculares, tal como menciona el Departamento de Transporte de Texas (*Texas Department of Transportation, TXDOT*) (2002), metodología que

permite evaluar el comportamiento de los materiales estabilizados con asfalto (MEA).

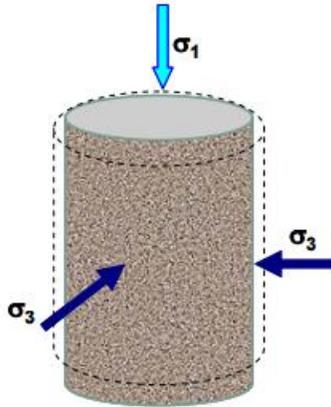


Figura 2.28 Principio de una prueba triaxial

Por medio de estos ensayos, es posible conocer los parámetros de cohesión y fricción del nuevo material estabilizado —a partir de la teoría de Mohr-Coulomb—, los cuales pueden ejemplificarse a través de la siguiente ecuación:

$$\tau_f = C + \sigma \tan \varphi \quad \text{Ecuación 3.4}$$

donde:

T_f = esfuerzo cortante

C = cohesión

s = esfuerzo normal actuando en el plano de falla

φ = ángulo de fricción interna

Así mismo, este principio puede graficarse para obtener los valores de C y φ (véase la Figura 2.29).

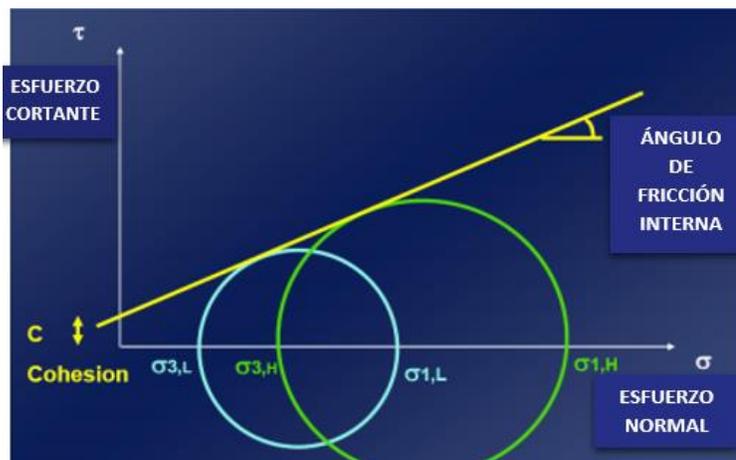


Figura 2.29 Gráfica Mohr-Coulomb de pruebas triaxiales monotónicas

La ejecución de la prueba se lleva a cabo a una temperatura ambiente de 25 °C, utilizando cuatro diferentes presiones de confinamiento (0, 50, 100 y 200 kPa), a una velocidad de aplicación de carga constante (3 mm/min). Para efectuar esta prueba triaxial, se requiere elaborar al menos ocho especímenes, cuyas dimensiones son 150 mm de diámetro y 300 mm de altura. La condición de humedad a utilizar en las pruebas triaxiales es de 50% de la humedad óptima de la mezcla, misma que se alcanza entre 48 y 72 horas después de la fabricación de los especímenes de ensayo (véase la Figura 2.30).

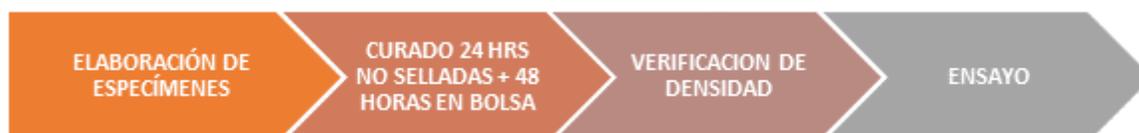


Figura 2.30 Procedimiento de acondicionamiento para ensayo de especímenes nivel III

2.4.3.1 Elaboración de especímenes/densificación

La elaboración de especímenes nivel III, utiliza la energía de compactación manual (NCHRP, 2004). Las dimensiones requeridas para el presente nivel se muestran a continuación en la tabla 2.13.

Tabla 2.13 Características de los especímenes según su nivel de diseño

Tamaño del espécimen y esfuerzo de compactación aplicado en el proceso de fabricación			
Diámetro del espécimen	Altura del espécimen	Energía de compactación	Nivel de diseño
150 mm	300 mm	NCHRP, 1-28A	Nivel III

Una vez preparado el material estabilizado con asfalto espumado y su correspondiente humedad óptima, se procede a utilizar el documento NCHRP 1-28A. En éste se presenta un esquema del molde a utilizar para elaborar los especímenes (véase la Figura 2.31), de ahí que se proceda a utilizar un molde de 150 mm de diámetro interior y 300 mm de altura efectiva (sin collarín), desmontable de la base y separable por la mitad para poder así extraer el espécimen elaborado sin dañarlo (véase la Figura 2.32).

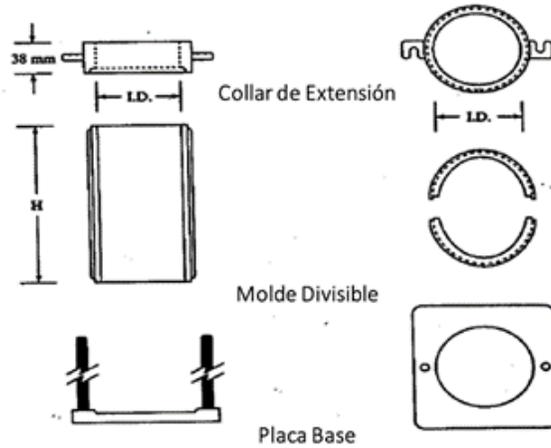


Figura 2.31 Características del molde para la elaboración de especímenes



Figura 2.32 Molde para la elaboración de especímenes

La energía de compactación a utilizar es de 56,000 ft-lbf/ft³ realizados mediante la compactación manual de 56 golpes con un martillo de 10 libras y una altura de caída de 18 pulgadas en nueve capas. Así también, se realiza el cálculo para obtener la cantidad de material requerido en su humedad óptima dentro del molde, lo anterior a partir de considerar el volumen de éste contemplando una altura adicional de 5 mm sobre el ras efectivo, con el propósito de que el material rebase el molde, para posteriormente poder enrasar el espécimen. De esta manera, es posible determinar la cantidad de suelo húmedo a compactar dentro del molde para alcanzar el peso volumétrico deseado (densificación), y mediante la Ecuación 3.5 presentada a continuación, poder calcular el peso de material por capa.

$$W_{\text{capa}} = \frac{\text{Peso total del espécimen}}{\text{número de capas}} \quad \text{Ecuación 3.5}$$

Posteriormente se realizan los cuarteos necesarios para disminución de muestras, y se dosifica el material requerido por capa; más adelante se procede a la compactación de la primera capa, verificando su correcta ejecución, así como una velocidad constante de aplicación de los impactos. Luego se realiza un escarificado posterior a la compactación y previo a la compactación de las capas subsecuentes.

Una vez completada la compactación del espécimen, se procede a enrasar la parte superior del mismo, y posteriormente se desacopla el molde (Figura 2.33).



Figura 2.33 Compactación, enrasado y desacoplamiento del molde

Como siguiente paso, se procede a registrar el peso del espécimen con el propósito de verificar la densificación requerida (Figura 2.34).



Figura 2.34 Pesado de espécimen

2.4.3.2 Procedimiento de acondicionamiento

El procedimiento de curado para especímenes se anexa en la Tabla 2.14, donde se muestra el proceso a seguir para alcanzar dicha humedad. La muestra elaborada se somete a un curado de 24 horas en un horno a 40 °C, para posteriormente ingresar el espécimen dentro de una bolsa sellada a 40 °C (Figura 2.35).

Tabla 2.14 Procedimiento de curado para ITS nivel III

Terminología	Diámetro de espécimen	Régimen de curado	Contenido de humedad	Diseño
TRIAXIAL _{EQUILIBRIO}	150 mm	24 horas no selladas (40 °C) + 48 horas en bolsa sellada (40 °C)	+/- 50% del contenido de humedad óptimo	Nivel III



Figura 2.35 Proceso de curado de los especímenes

A fin de realizar la prueba a diferentes presiones de confinamiento, se utiliza una membrana de látex alrededor del espécimen (véase la Figura 2.36) dentro de una carcasa desmontable. Posteriormente, mediante un compresor de aire y un manómetro, se regula la presión de la membrana para el posterior ensayo de ésta (Figura 2.37).



Figura 2.36 Colocación de la membrana de látex en el espécimen triaxial



Figura 2.37 Regulación de la presión de confinamiento en la membrana

Una vez estabilizada y verificada la presión de confinamiento requerida, se comienza a ejecutar el ensayo mediante el equipo de cómputo (véase la Figura 2.38).

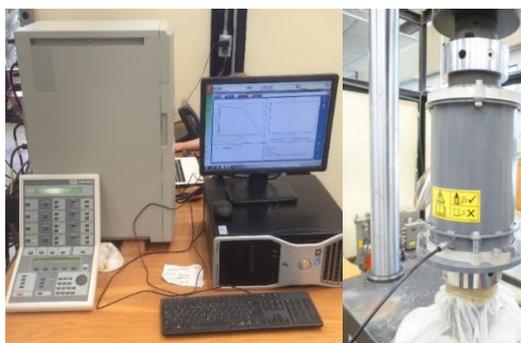


Figura 2.38 Montaje e inicialización de la prueba triaxial

Los valores mínimos requeridos para la clasificación de los materiales estabilizados con asfalto (MEA) son los parámetros mostrados en la Tabla 2.15

Tabla 2.15 Parámetros mínimos de diseño para el nivel III

Prueba o indicador	MEA 1
Cohesión (kPa) [kg/cm ²]	>250 [2.55]
Ángulo de fricción (°)	>40°

En una versión más reciente de esta metodología ya se considera un nuevo parámetro llamado cohesión retenida (C_{Ret}), cuyo objetivo es probar la confiabilidad en la obtención de los parámetros antes mencionados. Esta cohesión retenida se determina de la misma forma que en las probetas anteriores, cuya dimensión es la misma, pero en condición saturada y para un confinamiento de 100 kPa. Un valor mínimo del 75% de cohesión retenida en una prueba triaxial es aceptable para que los resultados sean confiables. La cohesión retenida se calcula como sigue:

$$C_{Ret} = \frac{(\sigma_{sat.}-100)}{(\sigma_{Equil.}-100)} * 100 \quad \text{Ecuación 3.6}$$

2.5 Indicador para el diseño estructural de pavimentos

La evaluación de la capacidad estructural de la mezcla de materiales se realizará mediante el ensayo de módulo de resiliencia. Esta evaluación tiene como objetivo incorporar los resultados obtenidos a un método de diseño estructural de pavimentos.

2.5.1 Instrumentación de la prueba de módulo de resiliencia

Para llevar a cabo la prueba de módulo de resiliencia, se utiliza el equipo triaxial cíclico, compuesto por tres unidades elementales:

1. Unidad de registro de información: consiste en un sistema computarizado que permite realizar las pruebas y ajustar los parámetros de secuencia y confinamiento, además de registrar la información proveniente de las otras dos unidades.
2. Unidad reguladora de presión: cuenta con una válvula reguladora de presión de confinamiento, controlada electrónicamente
3. Unidad de aplicación de carga: el marco de aplicación de carga para especímenes de suelos friccionantes cuenta con dos transformadores diferenciales de variación lineal (*Linear Variable Differential Transformers*, LVDT), dispositivos encargados de transmitir la magnitud de las deformaciones a la unidad de registro. Además, el marco cuenta con un pistón hidráulico, regulado en función de los ciclos de cargas requeridos. En dicho marco se coloca la cámara de confinamiento, al igual que la probeta a ensayar.



Figura 2.39 Equipo de laboratorio para módulo de Resiliencia

En la Figura 2.40, se anexa un esquema de la instalación de la cámara triaxial y sus componentes.

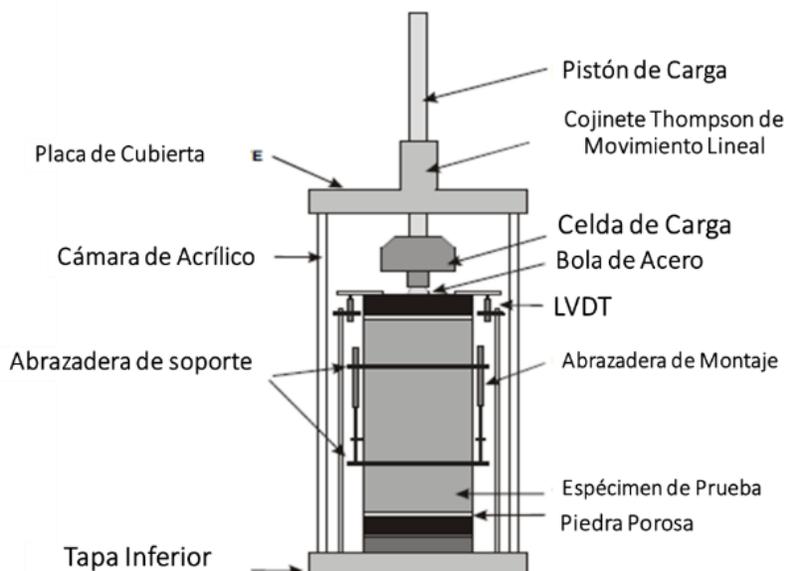


Figura 2.40 Esquema de los componentes de la cámara triaxial

2.5.2 Ensayo de la prueba módulo resiliente

Tal como se mencionó en la sección de elaboración de especímenes y tomando como referencia la publicación "Project 1-28^a" (NCHRP, 2004), se procede a preparar el equipo para realizar la prueba:

1. Previo a la colocación de la probeta se requiere introducir las secuencias a analizar en la prueba; en este caso, se introduce la secuencia para una base granular, tal como se muestra en la Tabla 2.16.

Tabla 2.16 Secuencia de ensayo para una base granular

Núm. de secuencia	Presión de confinamiento S_3		Presión de contacto		Esfuerzo axial cíclico		Esfuerzo desviador máximo		Repeticiones
	kPa	psi	kPa	psi	kPa	psi	kPa	psi	
0	103.5	15	20.7	3	207	30	227.7	33	1000
1	20.7	3	4.1	0.6	10.4	1.5	14.5	2.1	100
2	41.4	6	8.3	1.2	20.7	3	29	4.2	100
3	69	10	13.8	2	34.5	5	48.3	7	100
4	103.5	15	20.7	3	51.8	7.5	72.5	10.5	100
5	138	20	27.6	4	69	10	96.6	14	100
6	20.7	3	4.1	0.6	20.7	3	24.8	3.6	100
7	41.4	6	8.3	1.2	41.4	6	49.7	7.2	100
8	69	10	13.8	2	69	10	82.8	12	100

9	103.5	15	20.7	3	103.5	15	124.2	18	100
10	138	20	27.6	4	138	20	165.6	24	100
11	20.7	3	4.1	0.6	41.4	6	45.5	6.6	100
12	41.4	6	8.3	1.2	82.8	12	91.1	13.2	100
13	69	10	13.8	2	138	20	151.8	22	100
14	103.5	15	20.7	3	207	30	227.7	33	100
15	138	20	27.6	4	276	40	303.6	44	100
16	20.7	3	4.1	0.6	62.1	9	66.2	9.6	100
17	41.4	6	8.3	1.2	124.2	18	132.5	19.2	100
18	69	10	13.8	2	207	30	220.8	32	100
19	103.5	15	20.7	3	310.5	45	331.2	48	100
20	138	20	27.6	4	414	60	441.6	64	100
21	20.7	3	4.1	0.6	103.5	15	107.6	15.6	100
22	41.4	6	8.3	1.2	207	30	215.3	31.2	100
23	69	10	13.8	2	345	50	358.8	52	100
24	103.5	15	20.7	3	517.5	75	538.2	78	100
25	138	20	27.6	4	690	100	717.6	104	100
26	20.7	3	4.1	0.6	144.9	21	149	21.6	100
27	41.4	6	8.3	1.2	289.8	42	298.1	43.2	100
28	69	10	13.8	2	483	70	496.8	72	100
29	103.5	15	20.7	3	724.5	105	745.2	108	100
30	138	20	27.6	4	966	140	993.6	144	100

2. Se coloca una piedra porosa y un papel filtro sobre el cabezal inferior.
3. Encima de los anteriores se coloca el espécimen a ensayar, y sobre su parte superior se coloca otro papel filtro y otra piedra porosa, tal y como se aprecia en la Figura 2.41.



Figura 2.41 Colocación de probeta sobre la piedra porosa

4. Consecutivamente, se coloca una membrana de látex sobre la probeta, con el propósito de evitar la pérdida de humedad en ella en el transcurso de la prueba (véase la Figura 2.42).



Figura 2.42 Colocación de membrana de látex

5. Posterior a la colocación de la membrana se coloca la cámara de acrílico y se fija por medio de unos tornillos en las tapas superior e inferior.



Figura 2.43 Colocación de cámara de acrílico

6. Se enrosca la celda de carga con el pistón de carga.
7. Posteriormente se colocan los LVDT calibrados para establecer el nivel "cero desplazamientos" (deformación).

8. Se conectan los sensores a la unidad de registro y se anexa imagen del ensamble final de la probeta en el equipo triaxial cíclico.



Figura 2.44 Ensamblaje final sobre el marco de carga

Debido a que la unidad de control lleva a cabo todo el proceso de ejecución de la prueba, no se requiere manipularla, ya que es un proceso automatizado; sin embargo, se recomienda mantenerla bajo observación constante, debido a que suelen presentarse interrupciones por falta de comunicación o pérdida de corriente eléctrica. Se anexa una fotografía de la interfaz de monitoreo, donde se lleva a cabo la carga del ciclo de esta (véase la Figura 2.45).

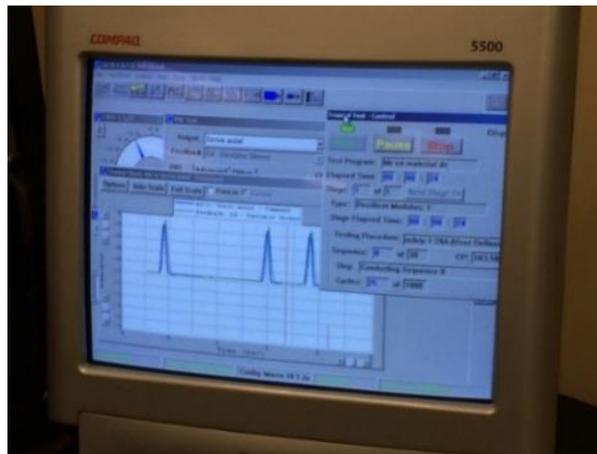


Figura 2.45 Interfaz de ejecución de prueba

Una vez concluido el ensaye, es posible retirar los especímenes una vez descargada la cámara triaxial. Primero, se procede a desmontar la cámara y luego a remover la membrana de látex. A continuación, se muestran algunos de los especímenes ensayados, como se muestra en la Figura 2.46.



Figura 2.46 Especímenes ensayados para obtención de M_R

3 Diseño de una base estabilizada con asfalto espumado

En este capítulo se reportan los resultados obtenidos al aplicar la metodología descrita en el capítulo 2, para la caracterización de los materiales, la obtención de una fórmula de diseño y la realización de una evaluación mecánica a la base estabilizada.

Se describen las diferentes consideraciones tomadas durante el diseño de la base estabilizada con asfalto espumado, así como los diferentes comportamientos mecánicos observados durante la ejecución de los ensayos de laboratorio.

Este proyecto consideró un material recuperado combinado carpeta-base hidráulica (50% RAP y 50% base hidráulica), el cual se mezcló con un material de banco con calidad de base hidráulica de TN de 1 ½”.

3.1 Características de los materiales asfálticos

El material asfáltico utilizado en el estudio fue un AC-20 proveniente de la refinería de Salamanca. La caracterización del material asfáltico se realizó por medio de la metodología SUPERPAVE grado PG. El concentrado de resultados obtenidos se presenta en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Resultados de calidad del material asfáltico analizado (grado PG)

Ensayo	Norma	Temperatura de prueba	Parámetro	Resultado	Especificación
Condición original					
Viscosidad	ASTM D4402-15	135 °C	η	0.466 Pa·s	≤ 3 Pa·s
Reómetro de corte dinámico (DSR)	ASTM D7175-15	64 °C	$G^*/\text{sen}\delta$	1.80 kPa	≥ 1 kPa
Envejecimiento en Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO), ASTM D2878-12					
Cambio de masa	ASTM D2872-12	163 °C	CM	-0.519 %	$\leq 1.0\%$
Reómetro de corte dinámico (DSR)	ASTM D7175-15	64 °C	$G^*/\text{sen}\delta$	9.38 kPa	≥ 2.2 kPa
Envejecimiento en vasija de presión y temperatura (PAV), ASTM D6521-13					
Reómetro de corte dinámico (DSR)	ASTM D7175-15	22 °C	$G^*(\text{sen}\delta)$	3881 kPa	$\leq 5,000$ kPa
Reómetro de viga a flexión (BBR)	ASTM D6648-08	-6 °C	S	66.7 MPa	≤ 300 MPa
			m	0.331	≥ 0.300

En esta evaluación, el asfalto se clasificó como un PG 64-16, tal como se muestra en la Tabla 3.2, lo cual indica que es un asfalto adecuado para su utilización en el proceso de espumado, ya que no presenta una viscosidad alta ni contiene un polímero que modifique sus propiedades reológicas.

Tabla 3.2 Grado PG del asfalto analizado

Esta muestra de ligante asfáltico se clasifica como un:
PG 64 – 16

3.2 Caracterización del material pétreo y RAP

La caracterización del material pétreo y RAP se realizó mediante los ensayos de límites de consistencia y granulometría. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 3.3. El material de RAP + BASE, presentó un límite líquido de 23.6%, con lo que se obtiene un valor de índice plástico de 5.2%. De acuerdo con la especificación establecida para este ensayo (Tabla 3.2), el material no necesita un pretratamiento inicial (adición de cal).

En cuanto al material de aporte (base hidráulica), los valores de límite líquido fueron inapreciables debido a la baja cantidad de material que pasa por la malla núm. 40, por lo cual, ninguno de estos materiales necesita un pretratamiento inicial.

Tabla 3.3 Resultados plásticos de los materiales analizados

Ensayo		RAP + base	Base 1-1/2"
Límite líquido	%	23.6	NP
Límite plástico	%	18.4	NP
Índice plástico	%	5.2	NP

Se presenta la distribución granulométrica de los materiales evaluados en una gráfica semilogarítmica. Se observa que la curva del material RAP + BASE intercepta el límite superior, es decir, el material se encuentra fuera de rango (valores entre la malla 1/4" y 1/2"), por lo cual, es necesario realizar una combinación con material virgen. En el apartado siguiente se verifica el porcentaje de material virgen a utilizar para cumplir con la especificación del asfalto espumado.

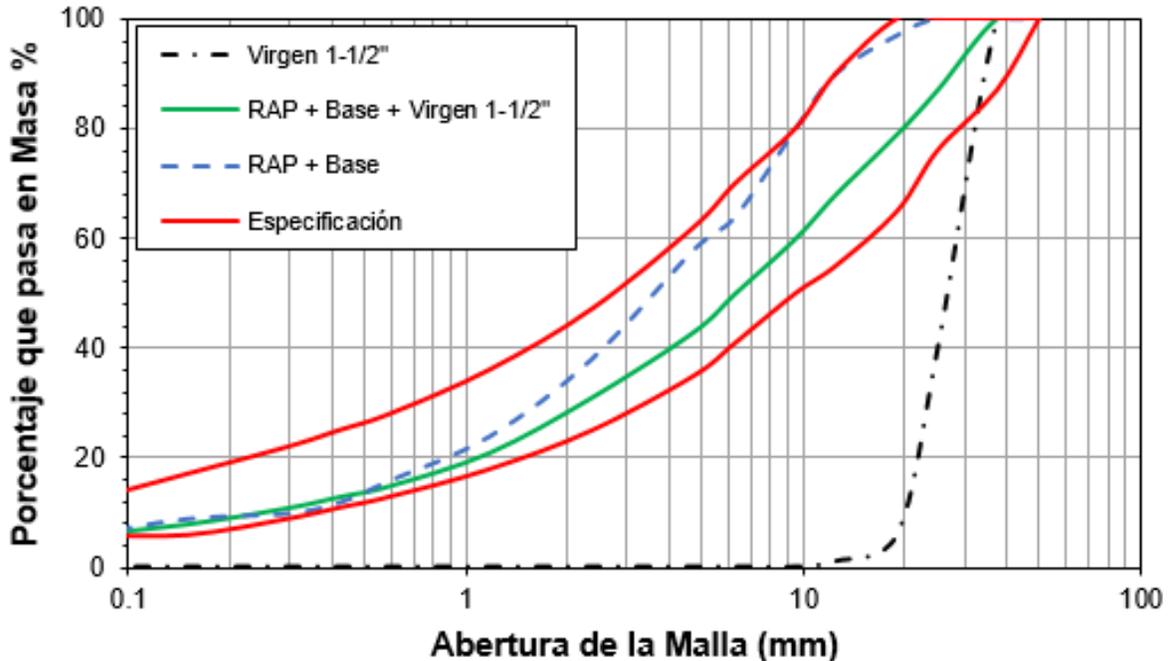


Figura 3.1 Curvas granulométricas de los materiales analizados

Es importante mencionar también que durante la manipulación del material RAP, se observó que el material es susceptible a disgregarse debido a que al agitar las partículas sobre las mallas se va degradando, por lo cual su granulometría podría variar durante su manipulación en la obra.

3.3 Granulometría de diseño

A partir de las granulometrías individuales, se propone una combinación de materiales que cumplan con lo establecido en la Tabla 3.4. Para esta determinación, se realizaron diferentes combinaciones teóricas de los porcentajes a mezclar de cada material.

3.3.1 Dosificación de materiales

Se decidió mejorar las curvas granulométricas a partir de una mezcla del material reciclado y el material virgen. Las combinaciones utilizadas fueron del 95 al 80% del material reciclado en variaciones del 5% (95% RAP-5% virgen, 90% RAP-10% virgen, 80% RAP-20% virgen). A partir del análisis de estas combinaciones teóricas, se determinó que la combinación que mejor cumplía con los requisitos granulométricos corresponde a la mezcla de 80% de RAP + base recuperada y 20% de material virgen 1-1/2" (Figura 4.2), la cual queda compuesta de 40% de RAP + 40% de base recuperada + 20% de material virgen 1-1/2".

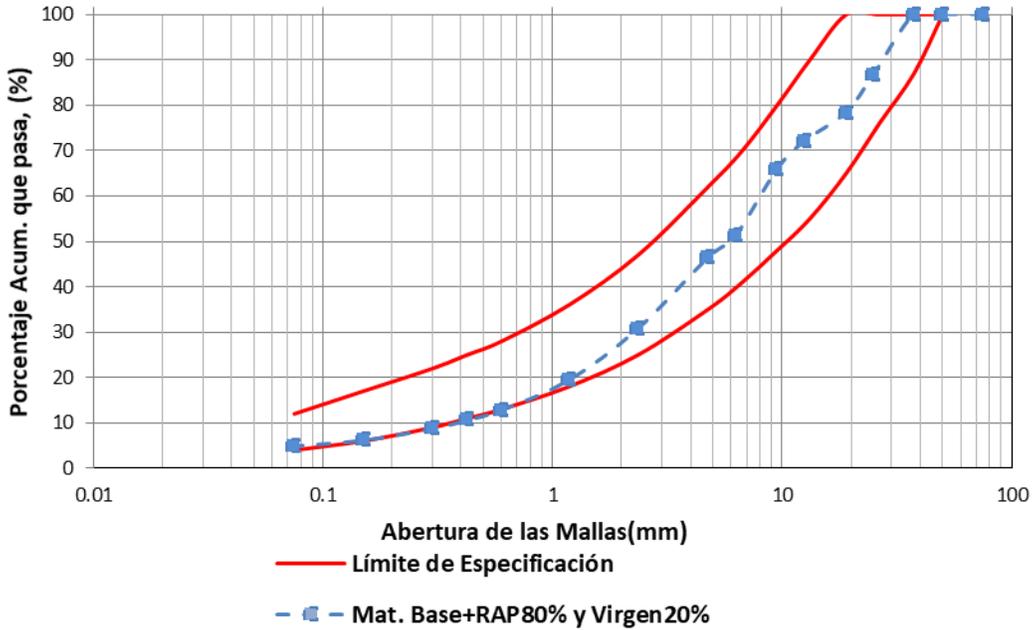


Figura 3.2 Curvas granulométricas finales

3.3.2 Densidad máxima

Una vez definida la mezcla de materiales para el diseño, se evaluó su grado de compactación de referencia mediante el ensayo de peso volumétrico seco máximo (PVSM). En este ensayo se obtuvo una humedad óptima de 8.0% y un PVSM de 2080 kg/m³ (Figura 3.3).

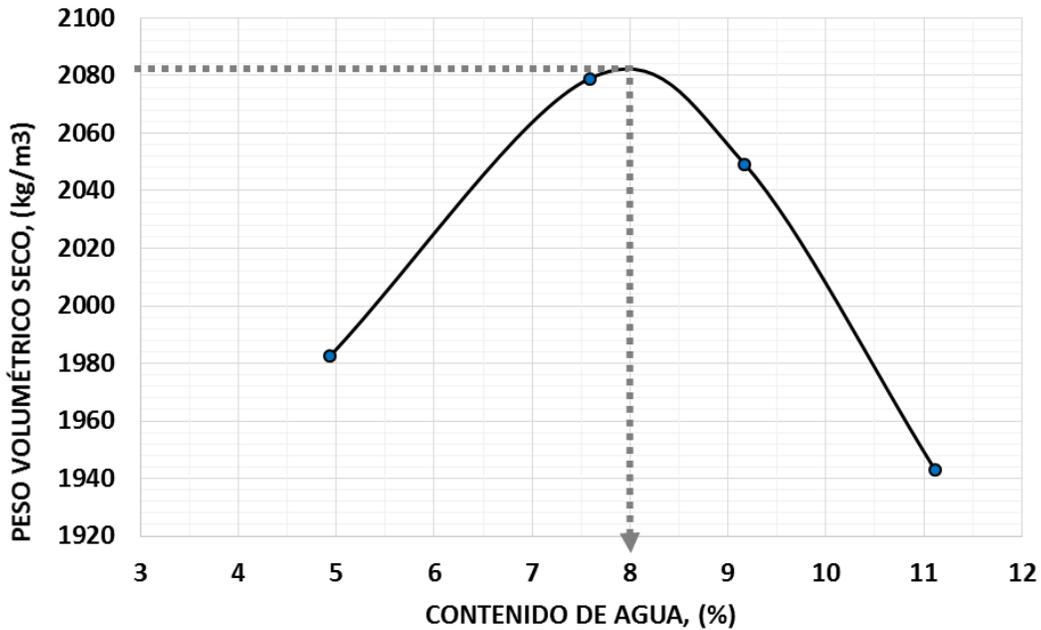


Figura 3.3 Peso volumétrico seco máximo para mezcla II

3.3.3 Proporción representativa

Para dosificar el material se realiza un procedimiento de proporción representativa, con el cual se calcula la cantidad de material requerido en función de su PVSM. A continuación, se muestra la cantidad de material requerido para elaborar una probeta de 150 mm de diámetro y 95 mm de altura (Tabla 3.4).

Tabla 3.4 Material requerido en proporción representativa para elaboración de nivel II de la mezcla II

γ_d MAX (kg/m ³)	2080	
W_{opt}	8%	
W_{nat}	1%	
D= 6" x H=95mm; V =	0.00167879	m3
Masa seca 6"	3491.9	gr

Además de corregir los valores obtenidos por la humedad natural propia del material, también es necesario prever el desperdicio. Para esta mezcla se dosificó una muestra de 23 kg (seis especímenes), la cual se mezcló en el equipo WLM-30. El cálculo de la proporción representativa se presenta en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5 Material requerido en proporción representativa para bacheo de 23 kg de mezcla II

MATERIAL A PONDERAR		23	kg
Porcentaje	80%	18,400.00	gramos
RAP + base			
Análisis de malla		Cantidad de material a ser incluido	
Tamaño de la malla (mm)	Porcentaje que pasa	Pasa 4.75 mm	Pasa 13.2 mm y se retiene en 4.75 mm
19	97	10670.44	5857.78
12.7	90		
4.75	58		
			Pasa 19 mm y se retiene en 13.2
			1871.78
Porcentaje	20%	4,600.00	Gramos
Virgen 1-1/2"			
Análisis de malla		Cantidad de material a ser incluido	
Tamaño de malla (mm)	Porcentaje que pasa	Pasa 4.75 mm	Pasa 13.2 mm y se retiene en 4.75mm
19	6	0.00	24.21
12.7	1		
4.75	0		
			Pasa 19mm y se retiene en 13.2
			4575.79

3.4 Propiedades espumantes del asfalto

Para encontrar los valores Re y $\tau_{1/2}$, se procede a realizar diferentes barridos de temperaturas a 160, 170 y 180 °C (véanse las Figuras 3.4, 3.5 y 3.6, respectivamente), con diferentes contenidos de agua (2, 3 y 4%) añadidos a cada una de ellas.

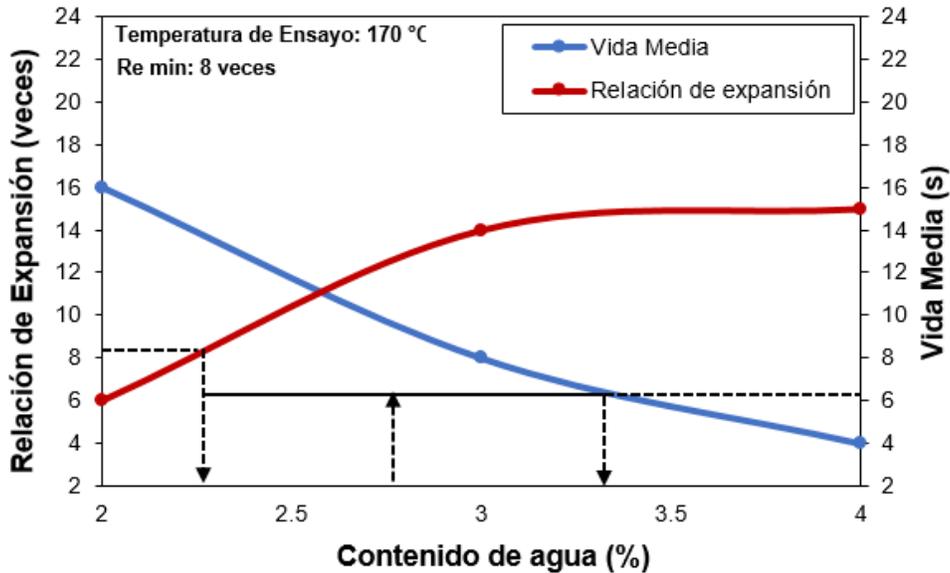


Figura 3.4 Propiedades espumantes a 160 °C

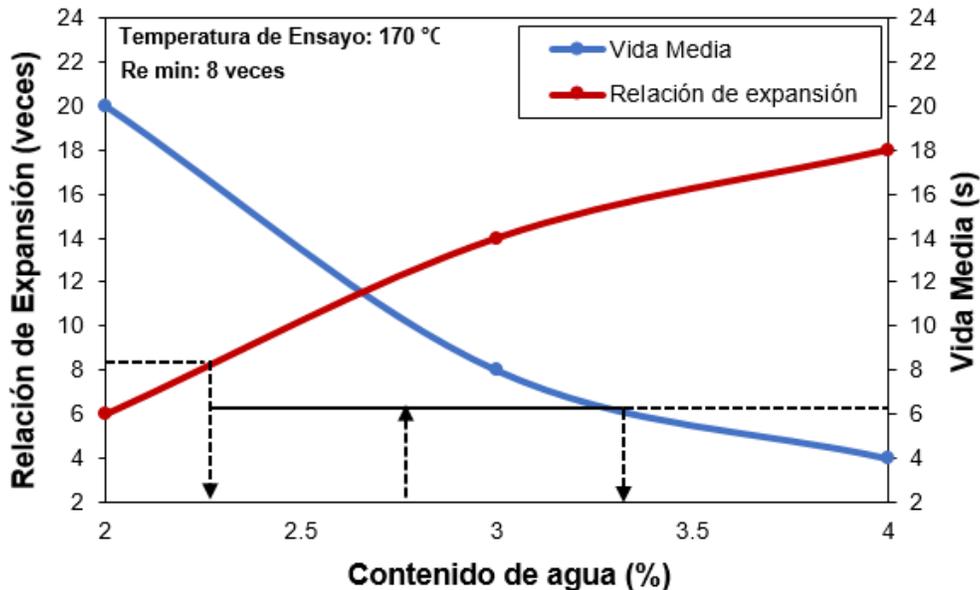


Figura 3.5 Propiedades espumantes a 170 °C

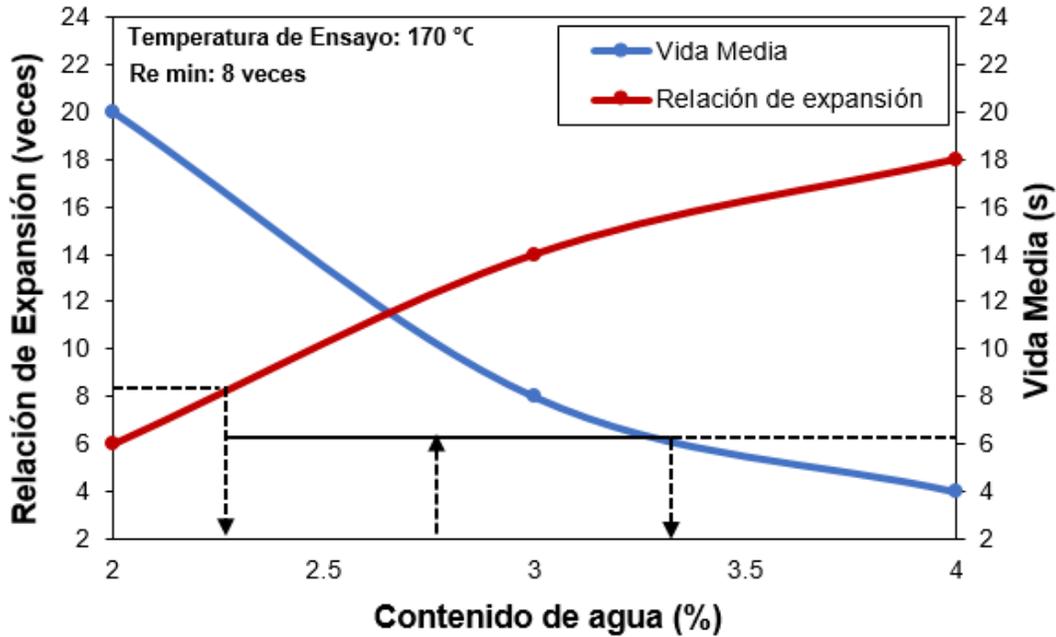


Figura 3.6 Propiedades espumantes a 180 °C

La determinación del contenido óptimo de agua se realiza al proyectar una línea (color rojo) partiendo de los valores límites mínimos mostrados anteriormente en las figuras (en este caso un valor de 8 para la Re y un valor de 6 para $\tau_{1/2}$); se prolonga dicha línea hasta intersectar las curvas y posteriormente se prolonga hacia el eje de las abscisas. Una vez proyectadas ambas líneas, se realiza el promedio de ambos contenidos de agua para obtener el contenido óptimo de agua (línea naranja). Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6 Propiedades espumantes del asfalto a diferentes temperaturas

Temperatura (°C)	Cantidad de agua (%)	Vida media (s)	Relación de expansión (veces)
160	2.7	8.5	9.8
170	2.7	10.5	12.2
180	2.7	8.5	9.5

Se observa que la temperatura de 170 °C con 2.7% de contenido de agua es la que presenta los mayores valores de vida media y de relación de expansión. Por ello, para fines de diseño se considera que ésta es la condición óptima de espumado del asfalto.

Es necesario mencionar que los valores obtenidos de la espuma se realizaron a una temperatura ambiente de 25 °C, por lo cual es importante considerarla como una variable más en la determinación, la cual dependerá de la región en donde se realice la obra.

El asfalto utilizado (EKBÉ – PG 64-22) es el asfalto que se produce en la mayoría de las refinerías en México, y por lo cual será el más común para su utilización en la fabricación de asfalto espumado. De la evaluación realizada, se concluye que éste es un asfalto apto para su utilización con esta metodología.

3.5 Diseño nivel I

Después de realizar la caracterización de los materiales y haber definido la granulometría y las condiciones de espumado del asfalto, se procede a la evaluación del nivel I de la metodología, la cual tiene como objetivo definir si la mezcla de materiales requiere la incorporación de un *filler* activo.

Primeramente, se realizó la evaluación de la mezcla sin inclusión de *filler* activo. En esta evaluación se observó que la mezcla obtuvo un valor de TSR en seco de 219 kPa, la cual es inferior al valor mínimo requerido de 225 kPa. Adicionalmente, no se observó resistencia en condición saturada, por lo cual se considera que esta mezcla no cumple con los requisitos mínimos de calidad y, por ello, se requiere agregar un *filler* activo. Ello explica por qué las siguientes dos evaluaciones se realizaron con 1% de cal y 1% de cemento portland.

En la evaluación en seco de las dos mezclas con *filler* activo, se puede observar que ambas cumplen con el requisito mínimo establecido en la metodología. Sin embargo, en condición saturada la mezcla con cemento portland pierde considerablemente su resistencia y se obtiene un valor de 13 kPa, lo que, a su vez, da como resultado un TSR de 5%, por lo cual se considera inadecuado para la mezcla de materiales propuesta. La mezcla de materiales con cal también tuvo una reducción de su resistencia en condición saturada, pero menos significativa (166kPa), lo cual le da como resultados un valor de TSR de 68%. Por ello, se considera que este *filler* activo es el más adecuado para la mezcla de materiales propuesta. Los resultados obtenidos en el diseño nivel I se presentan en la Figura 3.7.

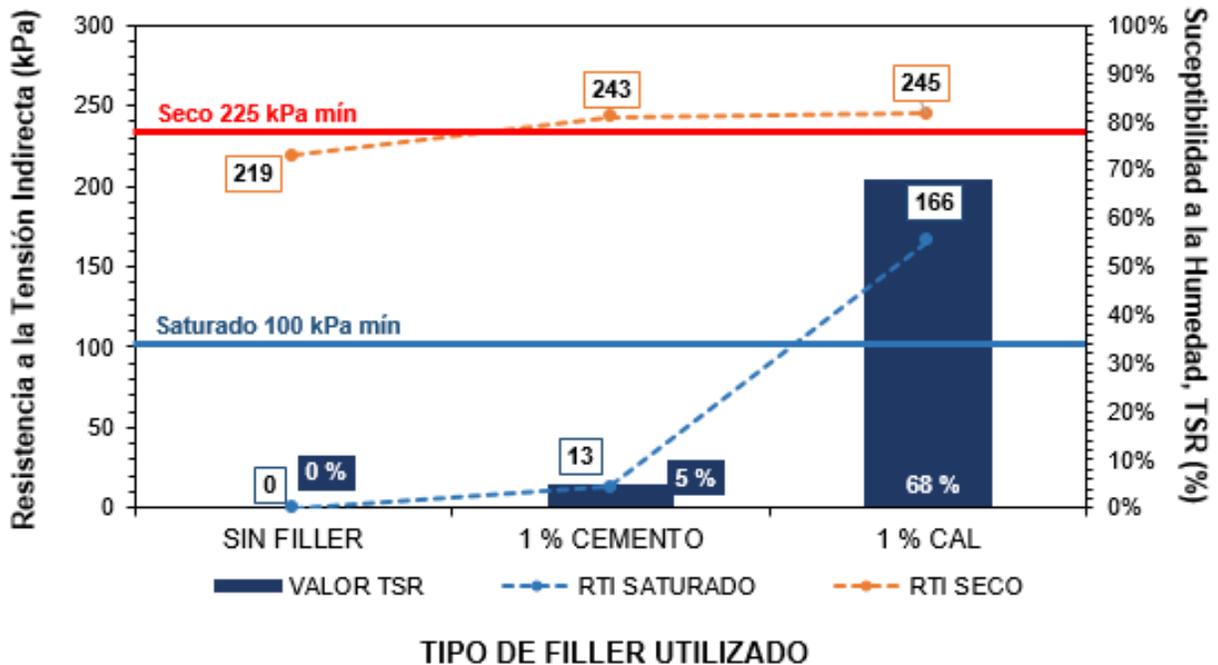


Figura 3.7 Valor TSR para selección de *filler* de la mezcla II

Para el presente nivel I es posible concluir que, a pesar de que todos los valores de ITS_{SECO} son de magnitudes similares, las propiedades en condición saturada son diferentes. Por ello, se puede concluir que el indicador clave en el diseño nivel I es la resistencia de la mezcla condición saturada, lo cual se debe tomar en cuenta tanto en el diseño como en el control de calidad de la base estabilizada con asfalto espumado.

3.6 Diseño nivel II

Una vez definido el *filler* activo a utilizar en la mezcla de materiales, se procede a determinar el contenido de asfalto espumado óptimo. Tal como se mencionó en la sección de metodología, la cantidad de 2.4% de asfalto espumado se ajusta en incrementos de 0.1%, es decir: se analizan los comportamientos mecánicos de la mezcla con valores de 2.2, 2.3, 2.4 y 2.5% de asfalto espumado, respectivamente, procedimiento que se efectúa mediante el ensayo de los especímenes de diseño nivel II.

La Figura 3.8 presenta los resultados obtenidos de la mezcla para diferentes contenidos de asfalto espumado, en la cual es posible apreciar los valores $ITS_{EQUILIBRIO}$ e $ITS_{EQUI-SAT}$, así como los valores de TSR obtenidos, siendo el valor de 2.4% de AE óptimo para el diseño debido a su poca variación, en comparación con el valor de 2.5%.

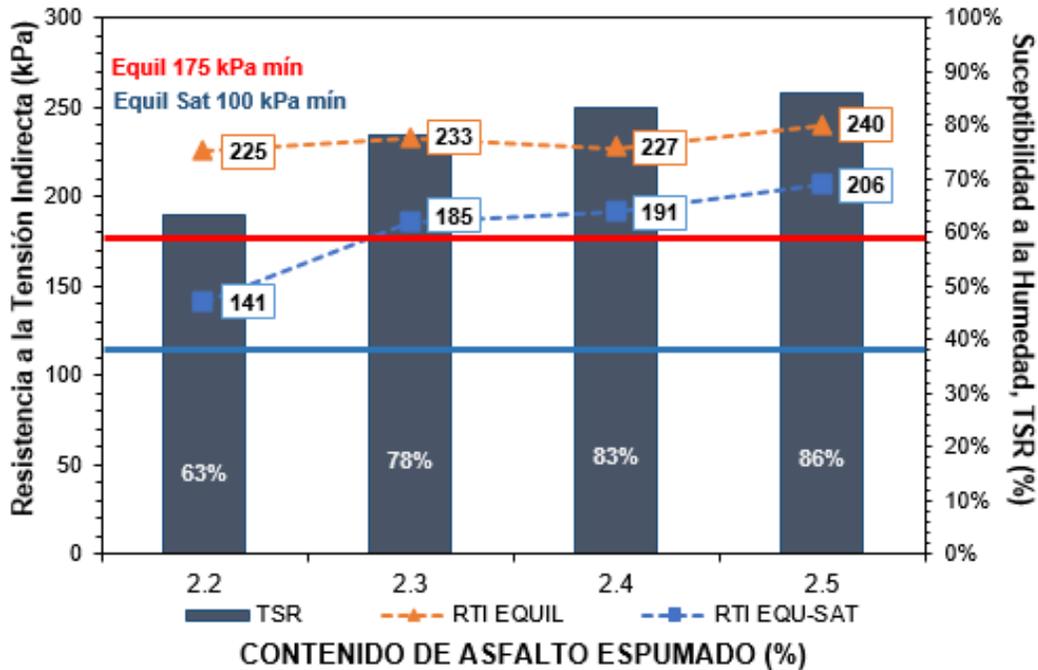


Figura 3.8 Contenido óptimo de asfalto con 1% de cal

De la figura anterior, es posible apreciar que el valor de $ITS_{EQUI-SATURADO}$ da la pauta al valor de TSR de la mezcla de materiales. Esta evaluación confirma lo observado en el nivel I, donde la evaluación en condición saturada define la selección de la mezcla más adecuada.

Por lo anterior, es posible concluir que la mezcla de materiales con 1% de cal y 2.4% de asfalto espumado cumple con las especificaciones establecidas en la metodología.

- $ITS_{EQUIL} = 227 \text{ kPa}$
- $ITS_{EQUI-SAT} = 197 \text{ kPa}$
- $TSR = 83\%$

Esta última evaluación define lo que se denomina como “fórmula de trabajo”, y es la siguiente:

- Mezcla II [RAP + BASE (80%) con 20% de material virgen 1- 1/2”] con una humedad óptima de 8.0% y un PVSM de 2080 kg/m³.
- Asfalto espumado producido a 170 °C de temperatura con 2.7% de agua.

- Uso de 1% de cal como *filler* activo con el propósito de disminuir la susceptibilidad a la humedad.
- Implementación de 2.4% de asfalto espumado a la mezcla.

Para el presente nivel II, es posible concluir que, a pesar de que los valores de ITS_{EQUI} con 2.4 y 2.5% de asfalto espumado son similares, por cuestiones de economía se utiliza el contenido de 2.4% de asfalto espumado. Adicionalmente es posible apreciar que el valor de TSR es superior al 80%, lo cual representa un buen desempeño aun con la presencia de humedad.

3.7 Diseño nivel III

Esta tercera evaluación tiene como objetivo evaluar las propiedades mecánicas de la mezcla de trabajo definida en las evaluaciones anteriores.

Para esta evaluación, se fabricaron ocho especímenes de ensayo para evaluarlos en el ensayo de triaxial. Se utilizaron cuatro condiciones de confinamiento (0, 50, 100 y 200 kPa) y se realizó una réplica en cada condición. La determinación de los valores de cohesión (C) y del ángulo de fricción (" ϕ ") se realizó mediante el círculo de Mohr-Coulomb. La Figura 3.9 presenta la envolvente de falla de la mezcla de materiales.

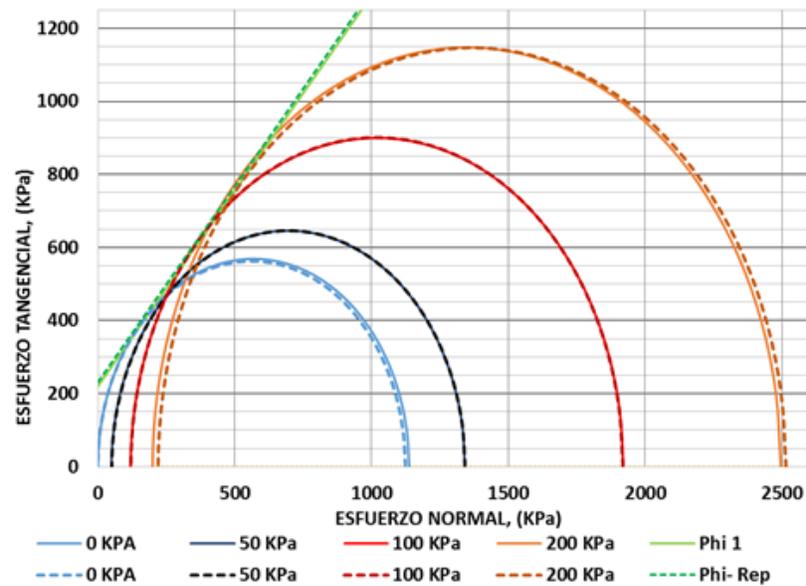


Figura 3.9 Cohesión y fricción para 2.4% de asfalto espumado y 1% de cal

Al trazar la envolvente de falla tanto de las primeras cuatro probetas como de las réplicas, es posible apreciar la tendencia de la envolvente de falla, de la cual se obtiene el valor de cohesión y fricción de la mezcla de trabajo. A continuación, se muestra la Tabla 3.7, en la que es posible corroborar dichos valores.

Tabla 3.7 Valores de cohesión y fricción para la mezcla II

Prueba	Cohesión, C (kPa)	Ángulo de fricción interna ϕ
2.4 % A.E.	251.1	44°
2.4 % A.E. - RÉPLICA	244.7	46°
Promedio	247.9	45°

Al analizar tabla anterior, se observa que el valor promedio de la cohesión es de 248 kPa, el cual es un valor ligeramente inferior al mínimo requerido (250 kPa). Por otra parte, el valor del ángulo de fricción interna supera los 40° requeridos en la especificación. Por consiguiente, es posible concluir que la mezcla de materiales cumple con las propiedades mecánicas requeridas en la metodología.

Si se requiriese aumentar el parámetro de cohesión para obtener un material que cumpla con el parámetro de cohesión, sería necesario poner énfasis en la curva granulométrica, aumentando el porcentaje de finos que pasa la malla 200, ya que esta última se encuentra solo por encima del límite inferior, lo que se traduce en una baja cohesión del material.

Como conclusión particular para el presente diseño, es sumamente importante vigilar el parámetro de cohesión del material y su posible variabilidad, debido principalmente a la dispersión granulométrica que se pudiese suscitarse en campo.

Además, al utilizar *filler* activo, es también importante mencionar que, una vez elaborada la mezcla, debe procederse a elaborar la compactación del espécimen lo antes posible, ya que la cohesión se encontrará en función de la densificación de la mezcla y, por ende, del grado de humedad al momento de realizar el proceso de compactación.

En una versión más reciente de esta metodología, ya se considera un nuevo parámetro llamado “cohesión retenida” (C_{Ret}), cuyo objetivo es probar la confiabilidad en la obtención de los parámetros antes mencionados. Esta cohesión retenida se determina de la misma forma que en las probetas anteriores, cuya dimensión es la misma, pero presenta una condición saturada y para un confinamiento de 100 kPa (Figura 3.10). Un valor mínimo del 75% de cohesión retenida en una prueba triaxial es aceptable para que los resultados sean confiables. La cohesión retenida se calcula como sigue:

$$C_{Ret} = \frac{(\sigma_{sat} - 100)}{(\sigma_{Equil} - 100)} * 100 \quad \text{Ecuación 4.1}$$

Cálculo de la cohesión retenida:

$$C_{Ret} = \frac{(1620 - 100)}{(1920 - 100)} * 100 = 84\% \quad \text{Ecuación 4.2}$$

En esta evaluación se obtuvo una cohesión retenida del 84%, por lo cual se reafirma que las propiedades mecánicas de la base estabilizada con asfalto espumado son apropiadas, ya que la cohesión obtenida en condiciones normales resulta ligeramente menor que la mínima especificada por esta metodología. Se observa, además, que la base estabilizada conserva una buena cohesión aun en condiciones críticas (Figura 3.10).

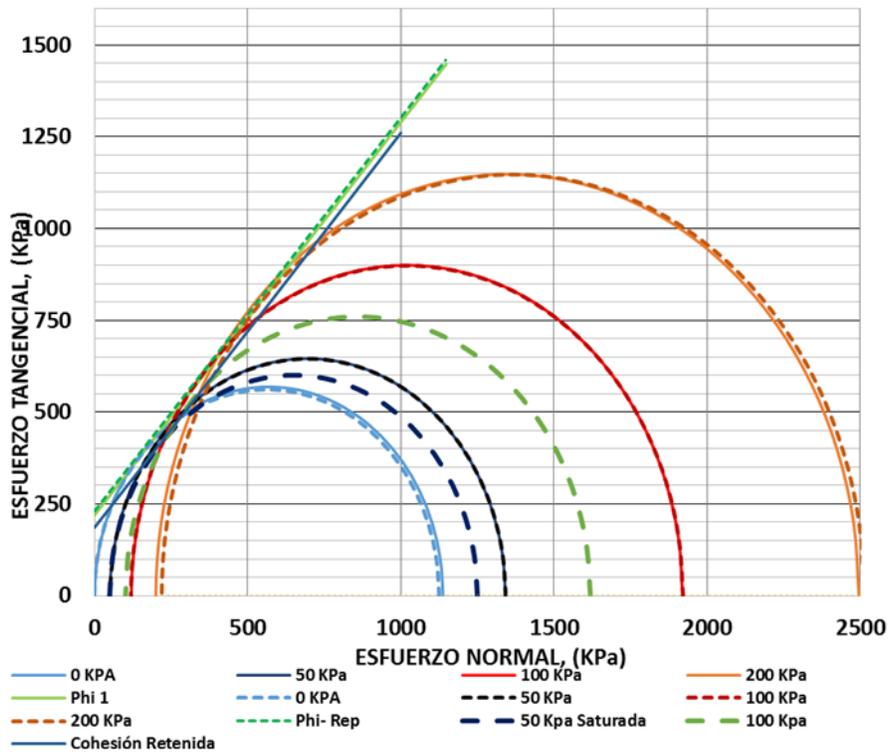


Figura 3.10 Ensayo triaxial en condición saturada

4 Indicador para el diseño estructural de pavimentos: módulo de resiliencia

Una de las dudas fundamentales al utilizar esta metodología es la capacidad estructural que pueden obtener las mezclas con asfalto espumado, por lo cual, fue necesario realizar una evaluación del M_R de la mezcla de materiales.

Las condiciones del ensayo fueron similares al diseño nivel III, es decir la metodología de compactación fue acorde con lo señalado en el apartado 3.4.3.1. Los resultados obtenidos de la prueba ejecutada para el 2.4% de asfalto espumado y el 1% de cal de la mezcla II, se presenta en la Figura 4.1, en la cual es posible apreciar que, para un confinamiento de 103.5 kPa (usualmente el valor del esfuerzo radial para un eje dual a una profundidad de 20 cm), se obtiene un módulo de resiliencia, que oscila entre 850 y 1150 MPa, y que, al aumentar el confinamiento, se alcanza un módulo desde 933 hasta 1161 MPa.

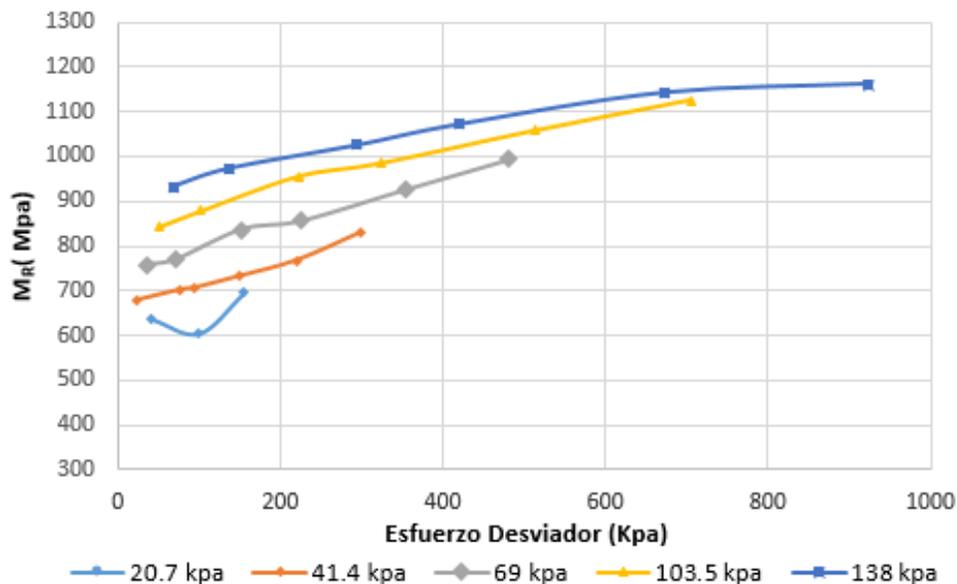


Figura 4.1 Ensayo MR para mezcla II con 2.4% de asfalto espumado y 1% de cal

Es importante poner énfasis en lo que se menciona anteriormente debido a que el M_R no es un valor único, sino que éste depende del confinamiento y la carga axial aplicada al espécimen, razón por la cual se opta por graficar el valor de M_R medido vs. el esfuerzo volumétrico (Θ), donde:

$$\theta = \text{Esfuerzo volumétrico } \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad \text{Ecuación 4.3}$$

De esta manera, es posible analizar el valor del M_R en función de Θ , y predecir así el comportamiento del material mediante cargas cíclicas. En la Figura 4.2, se grafican los valores obtenidos de M_R para cada uno de los esfuerzos volumétricos calculados. Los valores pueden analizarse con una línea de tendencia del comportamiento del M_R ($M_R = 174.39 \theta^{0.266}$, $R^2 = 0.9436$).

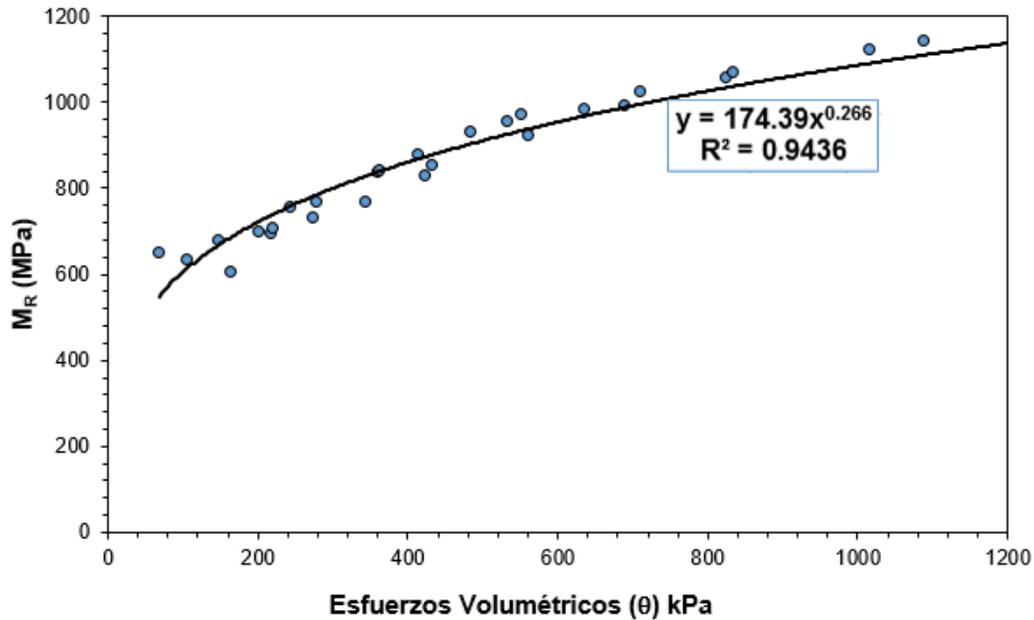


Figura 4.2 Módulo de resiliencia para una base estabilizada con 2.4% de A.E. y 1% de cal

Por esta razón, si se pretende conocer el valor de M_R en una estructura de pavimento, donde la capa de rodadura es una mezcla asfáltica con un valor de módulo elástico determinado, es posible conocer el valor de M_R de la base estabilizada al analizar la profundidad a la que se analizará el esfuerzo aplicado a la misma en función del tipo de tránsito esperado para dicha estructura vial.

La Figura 4.3 presenta el resultado obtenido con la base estabilizada con un contenido de 2.4% de asfalto espumado y 1% de cal, en comparación con una base hidráulica tradicional. De estos resultados se observa que la base estabilizada presenta un mejor comportamiento mecánico que la base hidráulica. Esta mejora se asocia a la utilización de un material reciclado, ya que la rigidez del RAP es superior a la de un material granular. Esto deja claro que, al utilizar material reciclado, no se presentará una falla asociada a la capacidad estructural de la mezcla de materiales.

La falla en este tipo de mezclas se presentará por una pérdida de cohesión por la inclusión del RAP, por lo cual, entre mayor sea la concentración del RAP, más altos serán los valores del módulo resiliente y menores los valores de cohesión.

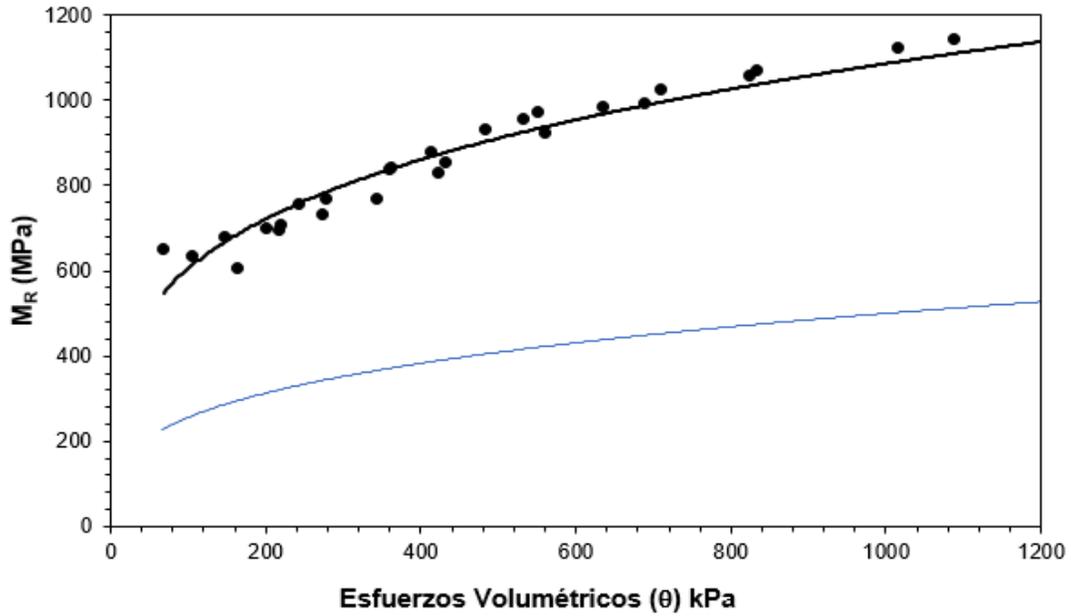


Figura 4.3 Comparativa de M_R de la mezcla II estabilizada con 2.4% de AE y 1% de cal vs una base hidráulica tradicional

Es posible afirmar que una base estabilizada con asfalto espumado tiene un mejor desempeño que una base hidráulica tradicional, lo que se traduce en un valor de MR mayor.

5 Conclusiones

Uno de los inconvenientes de la realización del diseño de la base estabilizada con asfalto espumado es que no se ha establecido un procedimiento de diseño en laboratorio; se establece, en cambio, que la realización del diseño a partir de la metodología delineada en el manual de Wirtgen es adecuada para la selección de la fórmula de trabajo de la base estabilizada con asfalto espumado, ya que permite seleccionar la mezcla de materiales con los mejores desempeños mecánicos.

El reto inicial en el diseño de la base estabilizada con asfalto espumado es definir su granulometría debido a que el material recuperado del pavimento (RAP) no cumple, en términos generales, con los requerimientos establecidos en la metodología y es necesario agregar material granular de aporte.

En lo referente a las propiedades del espumado, se observó que un asfalto PG 64-16 (Ekbé) es adecuado para esta aplicación, aunque cabe recordar que no se pueden utilizar asfaltos modificados para la fabricación del asfalto espumado.

En la evaluación de la resistencia a la tensión indirecta, se pudo observar que los valores en condición seca son similares para cada una de las variantes analizadas, siendo la evaluación en condición saturada el parámetro de selección de la mezcla de materiales en una base estabilizada con asfalto espumado, por lo cual se le debe prestar especial atención en los procesos de diseño y control de calidad de este tipo de estabilizaciones.

La adición de *filler* mejora la cohesión del material, pero reduce la fricción de la base estabilizada. Para el caso del contenido de asfalto espumado, se observa que, al aumentar este parámetro, disminuye la susceptibilidad a la humedad y aumentan los valores del módulo resiliente, lo cual indica un aumento de la capacidad

estructural de base estabilizada. Por ello, se debe realizar un análisis costo-beneficio para la correcta determinación de este valor durante el diseño.

El valor del módulo resiliente obtenido con una base estabilizada con asfalto espumado con RAP fue superior a los de una base granular. Este aumento obedece a que el RAP tiene una mayor rigidez que el material granular.

6 Bibliografía

Abbas, A., A. Ali, M. Nazzal, A. Alhassan, A. Roy y D. Powers (2013). "Effect of temperature reduction, foaming water content, and aggregate moisture content on performance of foamed warm mix asphalt", *Construction and Building Materials*, núm. 48, pp. 1058-1066.

Austrroads Ltd. (2015). "Design and Performance of Foamed Bitumen Stabilised Pavements", informe técnico AP-T303-15, *Progress Report 3*. Sydney, Australia.

Betti, G., G. Airey, K. Jenkins, A. Marradi y G. Tebaldi (2016). "Active fillers' effect on in situ performances of foam bitumen recycled mixtures", *Road Materials and Pavement Design*, pp. 281-296.

Dal Ben, M. y K. J. Jenkins (2014). "Performance of cold recycling materials with foamed bitumen and increasing percentage of reclaimed asphalt pavement", *Road Materials and Pavement Design*, vol. 15, núm. 2, pp. 348-371.

Fu, P., D. Jones, J. T. Harvey y S. A. Bukhari (2010). "Laboratory testing methods for foamed asphalt mix resilient modulus", 10, 187-212. *Road Materials and Pavement Design*.

He, G.-P., & Wong, W.-G. (2006). Effects of moisture on strength and permanent deformation of foamed asphalt mix incorporating RAP materials, 30-40. *Construction and Building Materials*.

He, G. P. y W. G. Wong (2007). "Laboratory study on permanent deformation of foamed asphalt mix incorporating reclaimed asphalt pavement materials", *Construction and Building Materials*, pp. 1809-1819.

Wirtgen (2012). *Wirtgen Cold Recycling Technology*. Windhagen, Alemania: Wirtgen GmbH.

Rafaelli, D. (2004). "Foamed Asphalt Base Stabilization". Programa de Transferencia de Tecnología, Instituto de Estudios de Transporte, Universidad de California en Berkeley.

Marek, I. y C. K. Anna (2013). "Laboratory Study on Mechanical Parameters of Foamed Bitumen Mixtures in the Cold Recycling Technology", *Modern Building Materials, Structures and Techniques*, núm 57.

Anexo A

A.1 Especificación particular en planta

A.1.1 Definición

La estabilización con asfalto espumado es una técnica para construir una base estabilizada de alta calidad reciclando los materiales del pavimento existente o utilizando material virgen. El resultado es una base granular unida discontinuamente mediante la dispersión del asfalto espumado en los finos del material, lo cual mejora la cohesión sin alterar el ángulo de fricción, además de disminuir considerablemente la susceptibilidad a la humedad.

Las bases espumadas no son susceptibles a presentar fallas por fisuración y fatiga; los criterios de falla y vida útil están determinados en función de la deformación permanente producida por la densificación del material.

A.1.2 Calidad de los materiales recuperados para la estabilización con asfalto espumado

A.1.2.1 Procedimiento de muestreo y preparación

A.1.2.1.1 Muestreo en campo

Como parte de la investigación de campo, se realizarán sondeos en todas las capas del pavimento con el objetivo de obtener muestras representativas de la estructura del pavimento. Cada capa del pavimento deberá ser muestreada por separado y por mínimo se deberán obtener 200 kg del material de cada capa que pueda ser intervenida en el proceso de estabilización y que, por tanto, requiera un diseño de mezcla. El número de sondeos dependerá de la longitud del tramo a evaluar y de la homogeneidad del mismo.

Nota: Las muestras de material deben obtenerse de forma representativa. Por ejemplo: si se va a utilizar la carpeta asfáltica para la fabricación de la base estabilizada con asfalto espumado, el material reciclado (RAP) debe obtenerse con una fresadora (o recicladora) para simular de mejor manera la granulometría que se obtendría durante el proceso de estabilización. Este proceso de fresado definirá el porcentaje del material reciclado a utilizar y el desempeño general de la base estabilizada.

Las capas a recuperar del pavimento existente dependerán de la rasante que se requiera conservar o del tipo de rehabilitación estructural que requiera el pavimento,

por lo cual, el material recuperado del pavimento existente para la elaboración de la base estabilizada con asfalto espumado puede ser tanto la carpeta asfáltica como la base hidráulica o la base hidráulica y la subbase.

A.1.2.3 Pruebas estándar de material muestreado

El porcentaje a reutilizar de cada una de las capas recicladas (carpeta-base o base-subbase) dependerá de las características físicas y de la granulometría de cada fracción recuperada. En cada una de las capas del material muestreado, se deberán llevar a cabo las siguientes pruebas estándar:

- Análisis de mallas para obtener la distribución granulométrica (ASTM C 136)
- Límites Atterberg para determinar el índice de plasticidad (ASTM D 4218)
- Relación humedad-densidad (AASHTO T-180)

Los requisitos por evaluar en el material granular se presentan en la Tabla A.1.

Tabla A.1 Características del material granular recuperado

Parámetro	Requerimiento
Índice de plasticidad	< 10
Porcentaje que pasa la malla No. 200	> 4
Contenido de humedad	Reportar

A.1.2.4 Estructura granulométrica

La granulometría de la muestra combinada deberá cumplir con lo especificado en la Tabla A.2. Es posible variar las proporciones del material a utilizar o el aporte de material virgen para adaptar la granulometría a los parámetros establecidos en dicha sección.

Tabla A.2 Requerimientos granulométricos BSM

No. malla	Abertura (mm)	Porcentaje que pasa ($\Sigma L > 10^6$)	
		Límite inferior	Límite superior
2"	50	100	100
1 1/2"	37.5	87	100
1"	25.4	76	100
3/4"	19	65	100
1/2"	12.5	55	90
3/8"	9.5	48	80
1/4"	6.4	41	70
No. 4	4.75	35	62
No. 8	2.36	25	47
No. 16	1.18	18	36
No. 30	0.6	13	28
No. 40	0.425	11	25
No. 50	0.3	9	22
No. 100	0.15	6	17
No. 200	0.075	4	12

A.1.2.5 Proporción representativa

Es preciso alcanzar la proporcionalidad de las muestras separando el material a granel en las siguientes cuatro fracciones:

1. La porción retenida en la malla de 19.0 mm.
2. La porción que pasa la malla de 19.0 mm, hasta la retenida en la malla de 13.2 mm.
3. La porción que pasa la malla de 13.2 mm, hasta la retenida en la malla de 4.75 mm.
4. La porción que pasa la malla de 4.75 mm.

Se procederá a reconstituir las muestras representativas con las clasificaciones determinadas anteriormente (para la muestra a granel) para la porción que pasa la malla de 19.0 mm. Luego, debe sustituirse la parte retenida en el tamiz de 19.0 mm con el material que pasa la malla de 19.0 mm y el retenido en la malla de 13.2 mm.

A.1.2.6 Contenido de humedad higroscópica

Dos muestras representativas secadas al aire, cada una de aproximadamente 1 kg, se utilizan para determinar el contenido de humedad higroscópica del material. (Nota: Para materiales con graduación más gruesa deberá incrementarse el tamaño de la muestra.) Las muestras secadas al aire se pesarán con una precisión exacta de 0.1 g, para después colocarlas en un horno a una temperatura de entre 110 y \pm

5 °C, hasta que conseguir una masa constante. El contenido de humedad higroscópica (W_{lugar}) es la pérdida de masa expresada en porcentaje con respecto a la masa seca de la muestra. Se procede a determinar la humedad higroscópica usando la ecuación 1:

$$W_{lugar} = \frac{(M_{húmeda} - M_{seca}) * 100}{M_{seca}} \quad \text{Ecuación A.1}$$

donde:

W_{lugar} = contenido de humedad higroscópica del lugar [% por masa]

$M_{húmeda}$ = masa del material secado al aire [g]

M_{seca} = masa del material secada en el horno [g]

A.1.3 Diseño de mezcla

Los procedimientos de diseño de mezcla estándar para estabilización con asfalto espumado se deberán llevar a cabo sobre las muestras de material obtenido del pavimento. El diseño de la base estabilizada con asfalto espumado comprende la preparación del asfalto espumado y cuatro niveles de diseño, los cuales se mencionan a continuación:

- Nivel 0: Determinar las propiedades espumantes del asfalto.
- Nivel I: Determinar la necesidad de adición de *filler* activo.
- Nivel II: Determinar el contenido de asfalto espumado.
- Nivel III: Determinar las propiedades mecánicas.
- Nivel IV: Determinar el módulo resiliente (M_R) (pavimentos de alto tránsito)

A.1.3.1 Nivel 0: Determinación de las propiedades espumantes del asfalto

A.1.3.1.1 Calidad del asfalto espumado

Las propiedades de espumado del asfalto son:

- Relación de expansión (R_e). Una medida de la viscosidad del asfalto espumado, calculado como la relación del máximo volumen de la espuma en relación con el volumen original del asfalto.
- Vida media ($\tau_{1/2}$). Medida de la estabilidad del asfalto espumado, calculado como el tiempo en segundos en que el máximo volumen de espuma colapsa a la mitad del volumen máximo.

A.1.3.1.2 Procedimiento para determinar las propiedades del asfalto espumado

El objetivo de llevar a cabo el siguiente procedimiento es determinar la temperatura del asfalto y el porcentaje de adición de agua necesario para producir las mejores propiedades de espumado (máxima relación de expansión y vida media) para una fuente particular de asfalto. Estas propiedades se miden a tres diferentes temperaturas del asfalto (160 a 180 °C) y tres diferentes contenidos de agua (2, 3 y 4%). Esta determinación se realizará en el equipo Wirtgen WLB 10S "Laboratorio de asfalto espumado".

Para la determinación de la adición óptima de agua por temperatura, se deberá trazar la gráfica de relación de expansión versus la vida media en los diferentes contenidos de agua. La adición óptima de agua se define como un promedio de los dos contenidos de agua necesarios para cumplir los criterios mínimos de espumado. (Figura A.1).

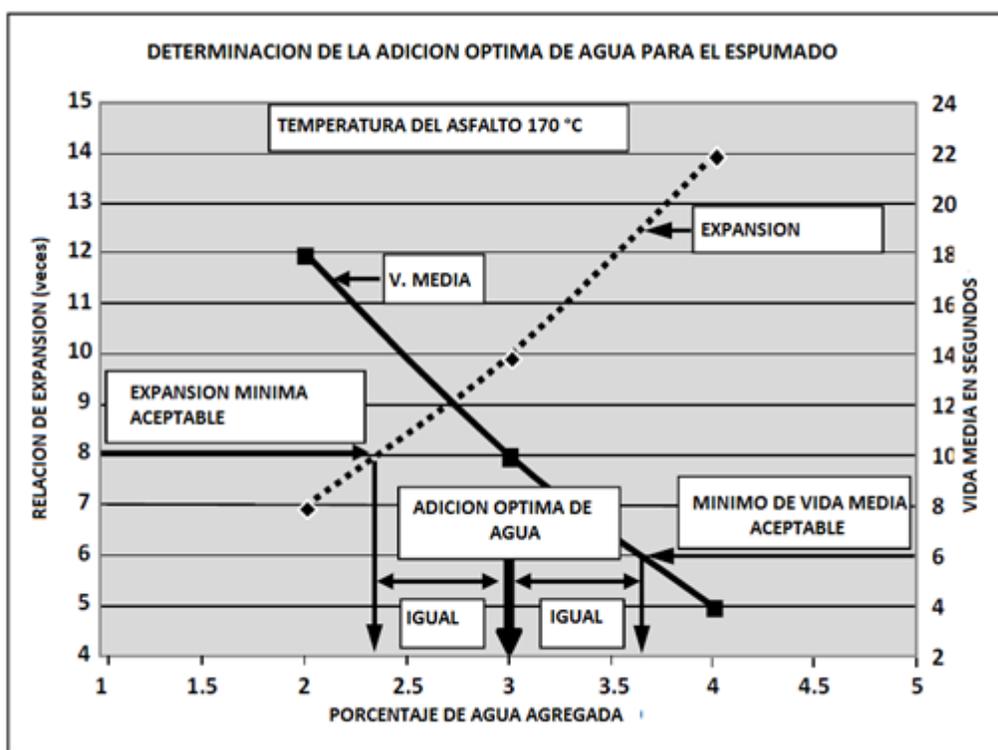


Figura A.1 Requerimientos granulométricos BSM

La temperatura y la cantidad óptima de agua agregada con las mejores características de espumado se utilizará en el proceso de diseño de mezcla. Si no se cumplen con los requerimientos mínimos establecidos en la Tabla A.3, el asfalto debe calificarse como no apto para su utilización como asfalto espumado. En ningún caso se deberá utilizar asfaltos modificados con polímeros.

Los valores mínimos de calidad que deberá cumplir el asfalto espumado se presentan en la Tabla A.3.

Tabla A.3 Características del asfalto espumado (límites mínimos)

Temperatura de los agregados	10 a 25 °C	Mayor a 25 °C
Relación de expansión (veces)	10	8
Vida media (segundos)	6	6

A.1.3.2 Nivel I: Determinar la necesidad de adición de *filler* activo

A.1.3.2.1 Efecto de la plasticidad

La estabilización con asfalto espumado se lleva a cabo normalmente en combinación con una pequeña cantidad de *filler* activo, debiendo ser éste un 1% máximo en masa (además de ser cemento portland o cal hidratada) para mejorar la dispersión del asfalto y reducir la susceptibilidad a la humedad, de acuerdo con lo que dicte el diseño de la mezcla.

El primer criterio por evaluar es el resultado en el ensayo de límites de consistencia. Esta prueba además de conocer la plasticidad del material tiene como objetivo conocer, mediante el valor de su índice plástico (IP), la posibilidad de que el material a utilizar requiera de un pretratamiento antes de utilizarse de acuerdo con lo establecido en la Tabla A.4.

Tabla A.4 Determinación de pretratamiento con filler

Índice plástico < 10	Índice plástico > 10
Llevar a cabo pruebas con especímenes de 100 mmØ para determinar la necesidad de añadir cemento o cal hidratada.	Pretratamiento del material con cal hidratada. El consumo inicial de cal (CIC) se debe determinar primero mediante la prueba de pH apropiada.

A.1.3.2.2 Determinación del requerimiento de *filler* activo

Para determinar el *filler* activo indicado, se elaboran especímenes de 150 mm de diámetro y 95 mm de altura, los cuales se someten a ensayos de RTI con el propósito de conocer el valor TSR. Para ello, se requiere elaborar seis especímenes para cada tipo de *filler* a analizar, siendo tres de ellos para condición seca y tres para condición húmeda, todos —a su vez— con el mismo porcentaje de asfalto espumado inicial, el cual es posible estimar a partir de la Tabla A.5.

Tabla A.5 Estimación inicial de asfalto espumado

Fracción que pasa la malla No. 0.075 mm (%)	Adición de asfalto espumado (% de masa del agregado seco)		Tipo de material típico
	Fracción que pasa la malla No. 4.75 mm		
	<50%	>50%	
<4	2.0	2.0	Asfalto reciclado (RAP)
4-7	2.2	2.4	RAP/grava triturada
7-10	2.4	2.8	RAP/grava triturada
> 10	2.6	3.2	Gravas/arenas

A.1.3.2.3 Procedimiento de acondicionamiento de los especímenes de ensayo

Después de elaborar los especímenes de ensayo (150 mm Φ y 95 mm h), tomando como referencia la densidad seca máxima obtenida con la prueba AASHTO T-180 del material en estudio, los especímenes se acondicionan introduciéndolos en un horno a 40 °C durante 72 horas. Una vez cumplido este tiempo, se extraen del horno y se pesan inmediatamente, para después volverse a introducir en el horno a la misma temperatura, pero por un lapso de cuatro horas. Posteriormente, se vuelven a extraer, al cumplirse ese lapso, y se pesan de nuevo. En caso de observarse una $D > 10$ gr, se vuelven a introducir en el horno por un lapso de 24 horas, operación que se repite tantas veces como sea necesario. Este primer procedimiento estándar para secar las muestras a masa constante se denomina RTI_{SECO} . En un segundo acondicionamiento de nivel I, se parte de realizar el mismo procedimiento de RTI_{SECO} para posteriormente sumergir el espécimen en agua a 25 °C \pm 2 °C durante 24 horas. A este proceso de curado se le designa $RTI_{SATURADO}$. Para fines de terminología y detallar el proceso de acondicionamiento, se anexa la Tabla A.6.

Tabla A.6 Procedimiento de acondicionamiento para nivel I

Terminología	Diámetro de espécimen	Régimen de curado	Contenido de humedad	Diseño
RTI_{SECO}	150 mm	72 h no selladas (40 °C)	< 1%	Nivel I
$RTI_{SATURADO}$		RTI_{SECO} + 24 h sumergidas (25 °C \pm 2 °C)	Saturadas	

A.1.3.2.4 Resistencia a la tensión indirecta

El ensayo de resistencia a la tensión indirecta (*Indirect Tensile Strength, ITS*) se utiliza para conocer el esfuerzo máximo admisible de los especímenes de ensayo. Dichas pruebas se realizan para determinar el daño potencial que pudiera suscitarse ante la presencia de humedad en campo (susceptibilidad a la humedad de la base estabilizada).

El ensayo de resistencia a la tensión indirecta se calcula de la siguiente forma:

$$RTI = \frac{2 \times P}{\pi \times h \times d} \times 1'000,000 \quad \text{Ecuación A.2}$$

donde:

RTI = resistencia a la tensión indirecta [kPa]

P = carga máxima aplicada [KN]

h = altura promedio del espécimen [mm]

d = diámetro del espécimen [mm]

Se realizan entonces los ensayos de RTI_{SECO} (tres especímenes) e RTI_{SATURADO} (tres especímenes), para posteriormente obtener el valor TSR (del inglés: *Tensile Strength Ratio*), la cual es la relación entre el promedio de los valores de RTI_{SATURADO}, dividido entre los valores de RTI_{SECO} para un grupo específico de especímenes, expresado en porcentaje mediante la Ecuación 3.3.

$$TSR = \frac{\text{Prom RTI}_{\text{SATURADO}}}{\text{Prom RTI}_{\text{SECO}}} \times 100 \quad \text{Ecuación A.3}$$

donde:

Prom ITS_{SATURADO} = valores ITS saturados promedio [kPa]

Prom ITS_{SECO} = valores ITS secos promedio [kPa]

Los criterios de aceptación del ensayo de resistencia a la tensión indirecta y TSR se presentan en la Tabla A.7.

Tabla A.7 Características mínimas de aceptación nivel I

Prueba	Diámetro de espécimen	kpa
RTI _{SECO}	150 mm	>225
RTI _{SATURADO}	150 mm	>100
TSR	> 60%	

El criterio para determinar la necesidad de *filler* activo es el siguiente:

SIN FILLER - Cuando la mezcla sin *filler* obtiene un valor TSR>60%.

FILLER – Cuando la mezcla sin *filler* obtiene un valor TSR<60%. Se utiliza entonces la mezcla con *filler* que logra un D> 5% respecto a la otra mezcla. En caso de que la diferencia de ambos sea <5%, cualquiera de ambos *filler* propuestos es el adecuado.

A.1.3.3 Nivel II: Determinar el contenido de asfalto espumado

El contenido de asfalto espumado determinado será producto del diseño de la mezcla, cuya determinación será responsabilidad del contratista, previa revisión y validación de la supervisión de obra.

A.1.3.3.1 Especímenes de ensayo

Una vez seleccionado el *filler* activo que brinda el mejor desempeño en la mezcla, se procede a determinar el contenido óptimo de asfalto espumado. Partiendo del contenido de asfalto espumado inicial (nivel I), se ajustan los valores por encima y debajo del punto analizado, regularmente en incrementos de $\pm 0.2\%$ y -0.4% de asfalto espumado en relación con su peso volumétrico seco.

El ensayo a realizar en el nivel II es similar al ensayo de la prueba en el nivel I, y se determinará el esfuerzo máximo admisible a tensión y la susceptibilidad a la humedad de la base estabilizada con asfalto espumado a diferentes concentraciones.

Se elaboran también especímenes de 150 mm de diámetro y 95 mm de altura, los cuales se someten a los ensayos de RTI con el propósito de conocer el valor TSR. Para ello, se requiere elaborar seis especímenes para cada contenido de asfalto espumado a analizar: tres de ellos para condición seca y tres para condición húmeda.

A.1.3.3.2 Procedimiento de acondicionamiento

Después de elaborar los especímenes de ensayo (150 mm Φ y 95 mm h), tomando como referencia la densidad seca máxima obtenida con la prueba AASHTO T-180 del material en estudio, los especímenes se acondicionan introduciéndolos en un horno a 40 °C durante 72 horas. Una vez cumplido este tiempo, se extraen del horno y se pesan inmediatamente, para después volverlos a introducir en el horno a la misma temperatura, pero durante un periodo de cuatro horas, pasado el cual se vuelven a extraer y se pesan de nuevo. En caso de registrarse una $D > 10$ g, se vuelven a introducir en el horno por un lapso de 24 horas, operación que se repite tantas veces como sea necesario. Este primer procedimiento estándar para secar las muestras a masa constante se denomina RTI_{SECO} . En un segundo acondicionamiento de nivel I, se parte de realizar el mismo procedimiento de RTI_{SECO} para posteriormente sumergir el espécimen en agua a $25 \text{ °C} \pm 2 \text{ °C}$ durante 24 horas, proceso de curado que se designa como $RTI_{SATURADO}$. Para fines de terminología y conocer el proceso de acondicionamiento a detalle, se anexa la Tabla A.8.

Tabla A.8 Procedimiento de acondicionamiento para nivel I

Terminología	Diámetro de espécimen	Régimen de curado	Contenido de humedad	Diseño
RTI _{SECO}	150 mm	72 h no selladas (40 °C)	< 1%	Nivel II
RTI _{SATURADO}		RTI _{SECO} + 24 h sumergidas (25 °C ± 2 °C)	Saturadas	

Los parámetros mínimos existentes para poder aceptar o rechazar el diseño nivel II son los valores que se muestran a continuación en la Tabla A.9.

Tabla A.9 Características mínimas de aceptación nivel II

Prueba	Diámetro de espécimen	kPa
RTI _{SECO}	150 mm	>225
RTI _{SATURADO}	150 mm	>100
TSR	>60%	

La cantidad de asfalto espumado que cumpla con los valores mínimos de ITS se seleccionará como el indicador primario para la cantidad mínima de asfalto espumado que se deberá agregar a la mezcla. Entonces quedará a criterio del diseñador determinar la cantidad de asfalto espumado que necesita agregarse a la mezcla para tener confianza suficiente en el diseño, con base en la variabilidad de los resultados (la "bondad de ajuste" de la curva de regresión o línea a través de los resultados de la prueba graficada).

Después de la evaluación del nivel II, se obtiene la fórmula de trabajo para la elaboración de la base estabilizada con asfalto espumado.

A.1.3.4 Nivel III: Determinar las propiedades mecánicas

En este nivel se evaluará el comportamiento mecánico de la fórmula de trabajo definida en los niveles previos. Esta determinación se realizará mediante el ensayo triaxial simple en condición estática (TxDOT Designation: Tex-117-E).

A.1.3.4.1 Ensayo triaxial simple

El ensayo triaxial simple se lleva a cabo para determinar las propiedades de cohesión y ángulo de fricción interna de materiales estabilizados con asfalto espumado (BSM), con el fin de utilizar estos parámetros cuando se requiera realizar un diseño de pavimento con un método mecanicista.

A.1.3.4.2 Compactación del espécimen triaxial

La compactación se aplica utilizando un esfuerzo de compactación AASHTO modificado (AASHTO T180) en nueve capas, cada una de aproximadamente con 33 mm de espesor se compacta con 55 golpes con un martillo de 4.536 kg con una caída de 457 mm. Enseguida, se enrasa cuidadosamente cualquier exceso de

material de la muestra, conforme al procedimiento estándar descrito en el método de prueba.

A.1.3.4.3 Acondicionamiento del espécimen

El procedimiento de curado para especímenes tiene como objetivo alcanzar el "contenido de humedad de equilibrio" (50% de humedad óptima de la mezcla para simular condiciones de campo).

- Colocar los especímenes de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura en un horno a una temperatura de 40 °C durante 24 horas.
- Retirar los especímenes del horno, colocar cada uno en una bolsa de plástico sellada (al menos dos veces el volumen de la muestra) y colocar de nuevo en el horno a 40 °C durante otras 48 horas.
- Retirar las muestras del horno después de 48 horas y sacar de sus respectivas bolsas de plástico, asegurando que cualquier humedad en las bolsas no entre en contacto con la muestra. Dejar enfriar a 25 °C (± 2.0 °C) para su posterior ensayo.

A.1.3.4.4 Procedimiento de evaluación

Se requiere elaborar al menos ocho especímenes para esta prueba triaxial por cada diseño de nivel II alcanzado. Éstos son especímenes de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura. La condición de humedad de las pruebas triaxiales se determina con base en el proceso de acondicionamiento, es decir, se somete a ensayo al 50% de la humedad óptima de la mezcla. Es posible alcanzar dicha humedad alrededor de las 48-72 horas. Cada uno de los especímenes se somete a ensayo con su respectiva réplica a diferentes presiones de confinamiento (0, 50, 100 y 200 kPa) y a una velocidad constante de 3 mm/s, para poder así determinar mediante círculos de Mohr-Coulomb los parámetros de cohesión y fricción.

Los valores mínimos requeridos para la clasificación de los materiales estabilizados con asfalto espumado se presentan en la Tabla A.10.

Tabla A.10 Parámetros mínimos de diseño nivel III

Parámetro	Requerimiento
Cohesión (kPa) [kg/cm²]	>250 [2.55]
Ángulo de fricción (°)	>40°

A.1.3.4.5 Ensayo triaxial saturado

El ensayo triaxial simple se lleva a cabo para determinar la pérdida de cohesión en la base estabilizada en condiciones de saturación.

A.1.3.4.6 Compactación del espécimen triaxial

La compactación se aplica utilizando un esfuerzo de compactación AASHTO modificado (AASHTO T180) en nueve capas, cada una de aproximadamente 33 mm

de espesor; luego se compactan con 55 golpes con un martillo de 4.536 kg con una caída de 457 mm. Enseguida se enrasa cuidadosamente cualquier exceso de material de la muestra conforme al procedimiento estándar descrito en el método de prueba.

A.1.3.4.7 Acondicionamiento del espécimen

- Colocar los especímenes de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura en un horno a una temperatura de 40 °C durante 24 horas.
- Retirar los especímenes del horno; colocar cada uno en una bolsa de plástico sellada (al menos dos veces el volumen de la muestra) e introducir de nuevo en el horno a 40 °C durante otras 48 horas.
- Retirar las muestras del horno después de 48 horas y sacar de sus respectivas bolsas de plástico, asegurando que cualquier humedad en las bolsas no entre en contacto con la muestra. Dejar enfriar a 25 °C (± 2.0 °C) para su posterior ensayo.

A.1.3.4.8 Procedimiento de evaluación

Se requiere elaborar al menos dos especímenes para esta prueba triaxial por cada diseño de nivel II alcanzado. Éstos son especímenes de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura. La condición de humedad de las pruebas triaxiales se evalúa con base en el proceso de acondicionamiento. Los dos especímenes se someten a ensayos a una presión de confinamiento de 100 kPa en condición saturada y a una velocidad constante de 3 mm/s, para poder así determinar mediante círculos de Mohr-Coulomb los parámetros de cohesión y fricción.

La cohesión retenida se calcula como sigue:

$$C_{Ret} = \frac{(\sigma_{sat.} - 100)}{(\sigma_{Equil.} - 100)} * 100 \quad \text{Ecuación A.4}$$

Los valores mínimos requeridos para la clasificación de los materiales estabilizados con asfalto espumado se presentan en la Tabla A.11.

Tabla A.11 Parámetros mínimos de diseño nivel III

Parámetro	Requerimiento
Cohesión retenida (%)	>75
Ángulo de fricción (°)	>40°

A.1.3.5 Nivel IV: Determinar el módulo resiliente

En este nivel se evaluará el comportamiento mecánico de la fórmula de trabajo definida en los niveles previos. Esta determinación se realizará mediante el ensayo triaxial cíclico en condición dinámica (AASHTO T307).

A.1.3.5.1 Ensayo triaxial cíclico

El ensayo triaxial cíclico se lleva a cabo para determinar el valor del módulo resiliente (M_R) de materiales estabilizados con asfalto espumado (BSM), con el fin de utilizar estos parámetros cuando se requiera realizar un diseño de pavimento con un método mecanicista.

A.1.3.5.2 Compactación del espécimen triaxial

La compactación se aplica utilizando un esfuerzo de compactación AASHTO modificado (AASHTO T180) en nueve capas, cada una de aproximadamente 33 mm de espesor; se compactan con 55 golpes con un martillo de 4.536kg con una caída de 457 mm. Enseguida se enrasa cuidadosamente cualquier exceso de material de la muestra conforme al procedimiento estándar descrito en el método de prueba.

A.1.3.5.3 Acondicionamiento del espécimen

El procedimiento de curado para especímenes tiene como objetivo alcanzar el "contenido de humedad de equilibrio" (50% de humedad óptima de la mezcla para simular condiciones de campo).

- Colocar los especímenes de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura en un horno de a una temperatura de 40 °C durante 24 horas.
- Retirar los especímenes del horno; colocar cada uno en una bolsa de plástico sellada (al menos dos veces el volumen de la muestra) e introducirlo de nuevo en el horno a 40 °C durante otras 48 horas.
- Retirar las muestras del horno después de 48 horas y sacar de sus respectivas bolsas de plástico, asegurando que cualquier humedad en las bolsas no entre en contacto con la muestra. Dejar enfriar a 25 °C (± 2.0 °C) para su posterior ensayo.

A.1.3.5.4 Procedimiento de evaluación

Se requiere elaborar al menos dos especímenes para esta prueba triaxial por cada diseño de nivel II alcanzado. Éstos son especímenes de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura. La condición de humedad de las pruebas triaxiales se evalúa con base en el proceso de acondicionamiento, es decir, se somete a ensayos al 50% de la humedad óptima de la mezcla. Es posible alcanzar dicha humedad alrededor de las 48-72 horas. Los dos especímenes se someten a ensayos para obtener finalmente el valor del módulo resiliente de la base estabilizada con asfalto espumado.

Se registrará el valor obtenido como el valor de M_R medido vs. esfuerzo volumétrico (θ), donde:

$$\theta = \text{esfuerzo volumétrico} = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$$

Debido a que el M_R no es un valor único, sino que éste depende del confinamiento y la carga axial aplicada al espécimen, es posible analizar el valor del M_R en función

de (Θ), y predecir así el comportamiento del material mediante cargas cíclicas, lo que conlleva a realizar un análisis más confiable en un diseño de pavimentos.

A.1.4 Construcción

En lo relativo a la construcción de una capa con calidad de base estabilizada con asfalto espumado se deberán seguir los siguientes lineamientos:

La elaboración de la mezcla espumosa deberá realizarse en una planta estacionaria Wirtgen KMA 220 donde los materiales recuperados o de aporte serán tratados, cumpliéndose un control de calidad propuesto en el anexo 1, el cual se muestra el final del presente documento.

a) Paso 1: Fresado de carpeta existente

Con una máquina fresadora de pavimentos se retiran las capas del pavimento que no van a formar parte de la estabilización. De conformidad con lo especificado en cada proyecto, la máquina fresadora debe contar con un sistema de nivelación con sensores que asegure las profundidades de corte señaladas. Para el fresado de los materiales del pavimento, se utilizará una fresadora de pavimento con control de revoluciones en el tambor de fresado, tipo Wirtgen o técnicamente equivalente. La profundidad del fresado dependerá del resultado obtenido del diseño de la base estabilizada con asfalto espumado en laboratorio.

b) Paso 2: Almacenamiento del material

El material recuperado deberá transportarse a planta y almacenarse para su posterior estabilización. Las diferentes capas del pavimento deben mantenerse separadas para un mejor control de calidad.

c) Paso 3: Detección de baches

Una vez retiradas las capas requeridas, se hará circular un compactador neumático autopropulsado tipo Hamm GRW280 o técnicamente similar de al menos 16 toneladas, sobre todo en el ancho de la corona, con el fin de detectar zonas inestables de la superficie actual. En caso de encontrarlas, se efectuará un bacheo de caja para eliminar el material alterado, hasta una profundidad de cincuenta (50) centímetros, en promedio. La excavación deberá ser de forma rectangular, con sus lados alineados longitudinal y transversalmente a la carretera, y cuidando de no afectar el material más allá de los límites de la excavación. Si dicha superficie presenta exceso de humedad, se deberá excavar hasta que desaparezca o formar una plantilla para proporcionarle compactación utilizando material con una calidad que proporcione un soporte adecuado para las capas superiores del pavimento.

d) Paso 4: Estabilización de la base con asfalto espumado

1. Para la estabilización de la base espumada se utilizará una recicladora en frío Wirtgen WR 4200, la cual debe tener la capacidad de reciclar

capas de pavimento de gran espesor en una pasada; debe ser autopropulsada, y debe disponer de tambores de fresado de accionamiento hidráulico, una mezcladora de circulación forzada de dos árboles, una instalación de ligante de mando electrónico y una unidad de tendido de alta potencia.

2. Por cuanto a la estabilización de los materiales en la planta, los siguientes párrafos describen el proceso en que ésta se llevará a cabo:
 - Mezcla de los materiales: se efectuará en las proporciones definidas por el diseño particular de mezcla del proyecto (vírgenes, recuperados o de aporte) usando una planta de reciclaje en frío tipo Wirtgen KMA 220 o técnicamente equivalente, que conste de dos tolvas para la alimentación del material, con mallas de protección para el ingreso de sobretamaños y un sistema de banda —que facilite la proporcionalidad de los materiales alimentados, así como el control por masa de la alimentación—, además de una tolva y un sistema de alimentación de *filler* (cal o cemento) controlado por peso.
 - Inyección de agua: se instalará un sistema de inyección de agua. La cantidad de agua agregada a la mezcla deberá ser la necesaria para llegar al 65-80% del contenido óptimo de humedad de la prueba AASHTO Modificado (T-180), con el objetivo de alcanzar el nivel húmedo óptimo de material a reciclar. El agua se suministrará a través de una instalación adicional con tobera por separado. Deberá contarse, además, con una bomba excéntrica para absorber el agua directamente del camión cisterna o del depósito de agua de la máquina. La capacidad máxima de transporte de la bomba helicoidal excéntrica será de 400 l/min.
 - Inyección de asfalto espumado: El sistema de inyección de asfalto espumado deberá asegurar la expansión volumétrica y vida media del asfalto mediante la inyección de agua, aire y asfalto a una cámara de expansión de asfalto espumado con los parámetros definidos por el laboratorio para la fuente de asfalto.
 - Proceso de espumado: tendrá lugar en las cámaras de expansión de la barra de inyección. La capacidad máxima de transporte de la bomba de engranajes para asfalto, calentada de forma eléctrica, será de 500 kg/min. Contará con 8 toberas de barra de inyección de asfalto caliente las cuales se abrirán y cerrarán automáticamente mediante cilindros neumáticos.
 - Sistema de control en tiempo real: deberá contarse con uno que garantice de forma automatizada la dosificación de todos los

elementos de la mezcla en los porcentajes establecidos por el proyecto.

- Transporte: Una vez efectuada la mezcla el material puede transportarse en camiones directamente a sitio para su pavimentación o almacenarse en pilas para su uso posterior, en cuyo caso se deberá incorporar la humedad perdida durante su almacenamiento antes de pavimentarse.

Nota: No se recomiendan periodos de almacenaje mayores que tres meses.

- Tendido: La mezcla deberá tenderse con una pavimentadora que cuente con una regla de precompactación, así como con dispositivos para ajustar el espesor y el ancho de la mezcla tendida. Deberá contarse, asimismo, con un sistema que permita la repartición uniforme de la mezcla sin que se presente segregación por tamaños. Finalmente se compactará al grado requerido por el proyecto.
3. La compactación primaria se realizará seguidamente del extendido, para lo cual se utilizará un compactador de por lo menos 12 toneladas de peso con compactación dinámica en amplitud alta y frecuencia baja.
 4. La compactación secundaria se deberá realizar utilizando un compactador de rodillo liso con amplitud baja y frecuencia alta.
 5. Para efectos de protección en la compactación neumática, se rociará agua en la corona de la base y se hará circular un compactador neumático hasta cerrar los poros en la superficie. El laboratorio a cargo definirá el número de pasadas.
 6. Tiempo para la colocación de la carpeta: se deberá esperar hasta que el material extendido llegue al (50)% de su contenido óptimo de humedad, antes de extender la carpeta asfáltica.

MEDICIÓN: Para base espumada con asfalto, se tomará como unidad de medida el metro cúbico (m³); para fines de pago, se cuantificarán las unidades realmente ejecutadas en obra y ordenadas por el organismo responsable, considerando los volúmenes resultantes del espesor total excavados y secciones transversales, aproximando la cantidad con dos decimales.

BASE DE PAGO: El bacheo profundo aislado se pagará al precio unitario fijado, por precio por unidad de obra terminada (P.U.O.T), en el contrato para el metro cúbico (m³) compacto e incluye lo que corresponda por: excavación; rampas de acceso para introducir los equipos; limpieza parcial o total del área de trabajo necesaria, carga y desperdicio de los materiales sobrantes producto de excavación con acarreo hasta el banco de tiro; conformación del material existente en el almacén de desperdicio; conformación y acomodo del material extraído producto de esta

actividad en el almacén de desperdicio; compactación de la superficie descubierta al grado fijado; cargas, acarreos, suministro, adquisición y acomodo del material de la capa drenante; suministro, adquisición y compactación del material de subbase hidráulica; suministro, adquisición y compactación del material de base estabilizada con asfalto espumado; suministro, adquisición y compactación del material de carpeta asfáltica; suministro y adquisición de las emulsiones asfálticas y cemento asfáltico AC-20; agua empleada para compactación; aplicación del riego de liga y riego de impregnación; tiempos de vehículos empleados; acarreos; lo que corresponda por señalamiento preventivo de acuerdo con el *Manual de dispositivos para el control de tránsito en calles y carreteras* de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), y todas las actividades necesarias para la correcta ejecución de los trabajos.

A.1.4.1 Control de calidad

Los ensayos a realizar para la ejecución del tramo de prueba se dividen en tres partes: ensayos previos al diseño, ensayos durante la ejecución y control de calidad después de la compactación.

A.1.4.1.1 Ensayos previos al diseño

Estos ensayos tienen la finalidad de dar a conocer las características físicas de la estructura del pavimento existente. Se trata de un elemento fundamental para el correcto diseño de la rehabilitación del pavimento, ya que se está proponiendo un procedimiento de reciclaje de base con asfalto espumado en sitio.

En primer lugar, se deberá realizar un sondeo en el tramo de prueba, para el cual se determinarán las siguientes características de cada uno de los estratos.

- Determinación de número de estratos.
- Espesor de cada estrato, determinando su variabilidad a lo largo del tramo.
- Para el caso de la carpeta, se deberá obtener una muestra mediante fresado, y se procederá a determinar la granulometría de este material fresado.
- De las otras capas se determinarán la granulometría, el contenido de humedad, el grado de compactación y la densidad seca máxima. Se deberá analizar la variabilidad del material a lo largo del tramo.

Estos resultados servirán para definir el número de secciones homogéneas y los valores de referencia para el diseño de la base reciclada con asfalto espumado.

Para el caso de la carpeta asfáltica, se realizará la caracterización del material pétreo y la caracterización del ligante asfáltico para verificar que el grado PG cumpla con lo estipulado en el proyecto y la normativa vigente.

A.1.4.1.2 Ensayos durante la ejecución del tramo

El equipo a utilizarse para la construcción de la base con material reciclado mediante asfalto espumado es una recicladora en frío WR 4200 de Wirtgen, la cual permite reciclar la carpeta y la base hidráulica, incorporar el contenido agua requerido y elaborar el asfalto espumado.

En esta parte se verificará:

- Elaboración del asfalto espumado (expansión y vida media)
- Granulometría de la base
- Contenido de humedad
- Contenido de *filler* de aporte
- Ensayos de tensión indirecta en especímenes de campo (especímen de 95 mm de altura y 150 mm de diámetro)

La muestra se tomará inmediatamente detrás de la recicladora y después de conocerse el espesor total de la capa (antes de compactarse), para lo cual se anexa el procedimiento de control de calidad en campo mostrado a continuación.

A.1.4.2 Control de calidad (*BSM Workshop Kassel*): Métodos para muestreo y ensayo de materiales estabilizados con asfalto

A.1.4.2.1 Muestras de campo

Muestras de (± 1000 kg) de material tratado obtenido en sitio:

- Cuando el material se mezcla en sitio, la muestra se toma inmediatamente detrás de la recicladora y tras conocer el espesor total del material tratado (antes de compactarse).
- Cuando el material se mezcla en planta y se coloca con pavimentadora, las muestras deben tomarse ya sea en la planta de mezclado o en el sitio siguiendo un procedimiento de muestreo estándar.

Se debe colocar cada muestra en un contenedor hermético o en doble bolsa de plástico para prevenir pérdida de humedad. El contenedor (o bolsa) utilizado para el muestreo deberá ser suficientemente grande para asegurar que el material se mantiene en estado suelto y no se está compactando al interior del contenedor.

Las muestras de campo se transportan al laboratorio en las primeras dos horas después del muestreo y los especímenes de ensayo deben fabricarse en las primeras cuatro horas después del muestreo.

A.1.4.2.2 Preparación de la muestra

La muestra se prepara pasándola por la malla de 19 mm (3/4"). Debe descartarse la fracción retenida en la malla de 19 mm. La muestra se coloca en un contenedor hermético y se verifica que el contenedor se mantenga a una temperatura de entre 22 y 25 °C. Si la temperatura del material está fuera del rango establecido, se deberá colocar la muestra en un cuarto a temperatura controlada hasta que el material esté en el rango de temperatura establecido.

A.1.4.2.3 Ajuste del contenido de humedad

Las muestras de campo se encuentran generalmente entre 60% y 80% del contenido óptimo de humedad (COH), por lo que se deberá agregar el agua suficiente a la muestra para lograr el COH antes de realizar el proceso de compactación. Debido a la variabilidad del material reciclado, el COH exacto no puede conocerse de manera precisa, por lo cual se deberá realizar un estudio previo para determinar la variabilidad del material reciclado.

1.1. Cuando la densidad seca máxima (DSM) y el contenido óptimo de humedad (COH) del material se conocen con certeza relativa, los pasos a seguir son los siguientes:

- Estimar el contenido de humedad en campo.
- Ajustar el contenido de humedad de 20 kg de material para obtener el COH, mezclar a fondo y colocar en un contenedor hermético.
- Proceder de acuerdo con el apartado 4 y fabricar seis probetas de 152 mm de diámetro para ensayo.

A.1.4.2.4 Elaboración de especímenes de ensayo

Se determina la masa requerida para lograr un espécimen de 95 mm de altura y 150 mm de diámetro. Utilizando la masa obtenida se elaborarán seis especímenes.

En relación con la carpeta asfáltica, se revisará lo siguiente:

- Calidad de los materiales (agregado y asfalto)
- Contenido de asfalto
- Granulometría
- Temperatura de mezclado y compactación

A.1.4.2.5 Ensayos después de la compactación

En el caso de la base reciclada con asfalto espumado, se realizarán los siguientes ensayos después de la compactación:

- Granulometría
- Grado de compactación

Para el caso de la carpeta asfáltica, se extraerán núcleos para realizar los siguientes ensayos:

- Grado de compactación
- Granulometría
- Contenido de asfalto de la mezcla de campo
- Susceptibilidad a la humedad de la mezcla asfáltica
- Susceptibilidad a la deformación permanente de la mezcla asfáltica (rueda de Hamburgo)



Km 12+000 Carretera Estatal 431 “El Colorado-Galindo”
Parque Tecnológico San Fandila
Mpio. Pedro Escobedo, Querétaro, México
CP 76703
Tel +52 (442) 216 9777 ext. 2610
Fax +52 (442) 216 9671

publicaciones@imt.mx

<http://www.imt.mx/>

Esta publicación fue desarrollada en el marco de un sistema de gestión de calidad
certificada bajo la norma ISO 9001:2015