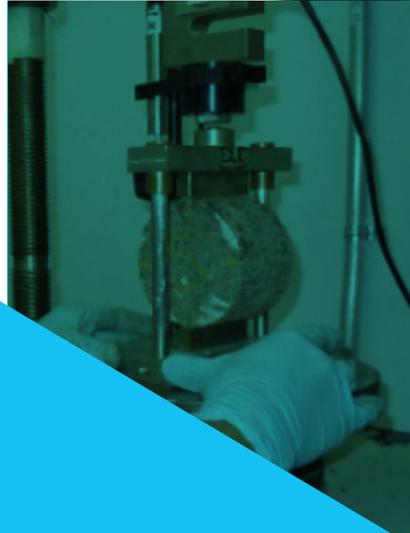




UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

Guía de diseño para
materiales estabilizados
con asfalto



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

Centro de Transferencia Tecnológica

Diagramación y diseño: Daniela Martínez Ortiz.

Control de calidad: Óscar Rodríguez Quintana.

Febrero, 2020.

Guía de diseño para materiales estabilizados con asfalto

Ulloa-Calderón, Andrea¹; Múnera-Miranda, Juan Carlos²

¹ Jefe laboratorio de técnicas de preservación LanammeUCR

² Técnico laboratorio de técnicas de preservación y estabilización de pavimentos LanammeUCR

Palabras clave:

asfalto, asfalto espumado, emulsión asfáltica, materiales estabilizados.

Resumen:

La siguiente guía propone procedimientos y especificaciones técnicas de diseño en laboratorio para materiales granulares estabilizados con emulsiones asfálticas o asfalto espumado. Una condición necesaria para garantizar un buen desempeño y eficiencia de los materiales componentes de estructuras de pavimento, es contar con procedimientos de laboratorio para el diseño y evaluación del desempeño que logren ser representativos de las condiciones reales a las que será sometido el material. Así mismo, el mejoramiento de materiales de menor capacidad o subproducto de procesos de intervenciones en carreteras para ser reutilizados y reciclados, toma cada vez más auge por razones ambientales y económicas al escasear las fuentes de materiales. Por estas razones, en Costa Rica se ha valorado el uso de materiales asfálticos para la estabilización de materiales granulares y capas asfálticas recicladas como alternativa para la rehabilitación en rutas de alto volumen de tránsito. Por lo que, uno de los retos de esta guía es, la correcta implementación de esta técnica para desarrollar una metodología de diseño y de especificaciones que permita el aseguramiento de la calidad, al discriminar acertadamente los materiales que tendrán un comportamiento adecuado de los que no, tomando en cuenta las condiciones climáticas propias del país, caracterizados por humedad y precipitaciones altas en muchas de las regiones.

Contenido

1. Introducción	1
2. Términos y definiciones	2
3. ¿Qué son los materiales estabilizados con asfalto?	5
3.1. Antecedentes	6
3.2. Principales características	7
3.3. Beneficios más evidentes del reciclado en frío para la rehabilitación de pavimentos	8
3.4. Mecanismos de falla	9
4. Materiales	11
4.1. Agregado	11
4.2. Emulsión asfáltica	14
4.3. Asfalto espumado	16
4.4. Relleno mineral activo	17
4.5. Agua	18
5. Selección del tipo de agente estabilizador	19
6. Diseño de mezcla para materiales estabilizados con asfalto	20
6.1. Muestreo	24
6.2. Ensayos preliminares	24
6.3. Análisis del efecto de la plasticidad	26
6.4. Conformación de la muestra	27
6.5. Humedad de mezclado	28
6.6. Evaluación de las características del espumado y la adherencia del asfalto	29
6.7. Determinación del requerimiento de relleno mineral activo	31
6.8. Mezclado del material con el asfalto	33
6.9. Compactación en laboratorio	38
6.10. Fabricación de especímenes de ensayo de 100 mm de diámetro	39

6.11	Fabricación de especímenes de ensayo de 150 mm de diámetro	41
6.12	Curado de especímenes	43
6.13	Preparación de especímenes para ensayo	45
6.14	Determinación de la resistencia a la tensión indirecta (ITS)	46
6.15	Resultados del diseño de mezcla	49
6.16	Ensayo triaxial para las propiedades de corte	50
6.17	Ensayo de módulo resiliente de materiales granulares	51
7.	Referencias	52
8.	Anexos	54
A1.	Procedimiento para calibrar el espumado del asfalto en laboratorio	54
A2.	Compactación vibratoria en laboratorio	56
A3.	Ensayo triaxial	60
A4.	Consideraciones para el diseño de pavimentos	66
A5.	Construcción	67

1. Introducción

La presente guía contiene un primer apartado relacionado con definiciones técnicas necesarias para el adecuado entendimiento, no solo de lo que se debe conocer como materiales estabilizados con asfalto, sino también de los procedimientos de diseño, de las propiedades y de las especificaciones técnicas para la clasificación en este tipo de materiales.

El objetivo específico de esta guía es proporcionar las herramientas necesarias para la aplicación de una metodología de diseño de materiales estabilizados con asfalto, apegado a la rigurosidad técnica necesaria para garantizar la calidad y el buen desempeño de las capas base de un pavimento, estabilizadas con emulsión asfáltica o asfalto espumado a nivel de laboratorio. Por lo tanto, se desarrolla la metodología de muestreo, ensayos preliminares y diseño en laboratorio de un material estabilizado con emulsión asfáltica y asfalto espumado. Adicionalmente, se incluye los procedimientos para la calibración del asfalto espumado, compactación vibratoria, ensayo triaxial simple y las consideraciones para el diseño de pavimentos tomando en cuenta este tipo de materiales.

Esta guía va dirigida a aquellas personas con formación profesional en laboratorio vial, que tengan como función la aplicación de agentes estabilizadores en materiales granulares o reciclados.

2. Términos y definiciones

Asfalto espumado: es un asfalto que se transforma en espuma al calentarse (160 °C – 175 °C) y mezclarse con una pequeña cantidad de agua atomizada (típicamente un 2 % de masa) dentro de una cámara de expansión. En estado espumado (un estado temporal de baja viscosidad), el asfalto puede ser adicionado y mezclado con agregados a temperatura ambiente y con contenido de humedad natural.

Curado: es el proceso mediante el cual la mezcla estabilizada, pierde humedad mediante la repulsión del agua por parte del asfalto y la expulsión del agua inducida por la compactación; aumentando su resistencia y la rigidez del material.

Deformación permanente: deterioro de las capas que conforman una estructura de pavimento, deformación inelástica acumulada por efecto de los esfuerzos cortantes (cargas que transitan una carretera), puede presentarse en forma de roderas o ahuellamientos (depresiones en las huellas de los neumáticos de los vehículos) y de desplazamientos horizontales.

Emulsión asfáltica: es la dispersión de pequeñas micro-partículas de asfalto dentro de una matriz acuosa que se mantiene estable por medio de un agente emulsificante. Las emulsiones típicamente contienen entre un 40 % a un 75 % de asfalto y a temperatura ambiente presentan consistencia líquida que va desde fluida hasta muy viscosa. El tamaño de la partícula se encuentra en un rango desde 0,01 a 20 micrones de diámetro. Existen emulsiones catiónicas o aniónicas, de rompimiento lento, medio o rápido, entre otras.

Fatiga: consiste en una serie de grietas interconectadas causadas debido a la falla por fatiga (se excede la resistencia a la tensión del material por el paso repetido de vehículos), las grietas se propagan desde el fondo de la capa de mezcla asfáltica hacia arriba. El deterioro aparece inicialmente como una serie de grietas longitudinales paralelas que conforme se someten a más pasadas vehiculares se interconectan y forman algo parecido al cuero de un lagarto. El deterioro ocurre solamente en áreas sujetas al paso repetido de los vehículos como las huellas de los mismos.

LanammeUCR: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, que bajo lo estipulado en el artículo 20 del Decreto Ejecutivo N° 37016-MOPT, del 7 de marzo de 2012, Reglamento al artículo 6 de la Ley de Simplificación y Eficiencia Tributaria N° 8114, tiene como función la creación y actualización del conjunto de documentos que conforman el Manual de Especificaciones.

Ligante asfáltico: es un producto natural que también se puede obtener a través del destilado del petróleo crudo y con el cual se generan mezclas asfálticas, asfaltos espumados y emulsiones asfálticas.

Material estabilizado con asfalto: material granular o combinación con material recuperado donde se incorpora emulsión asfáltica o asfalto espumado para aumentar la resistencia al corte y disminuir la susceptibilidad al daño por humedad.

MOPT: Ministerio de Obras Públicas y Transportes de Costa Rica.

Pavimento: estructura constituida por un conjunto de capas superpuestas, de diferentes materiales, adecuadamente compactados, que se construyen sobre la subrasante de la vía con el objeto de soportar las cargas del tránsito durante un período de varios años, brindando una superficie de rodamiento uniforme, cómoda y segura.

Pavimento flexible: pavimento cuya superficie de rueda está constituida principalmente por mezcla asfáltica y capas granulares sin estabilizar o estabilizadas con asfalto. En estos pavimentos la totalidad de la estructura interviene en la distribución de cargas. Dicha distribución depende de la trabazón entre agregados, la fricción entre partículas y cohesión (estabilidad).

RAP: siglas del inglés (*Reclaimed Asphalt Pavement*), es el término que se le da a cualquier material de mezcla asfáltica recuperado de un pavimento existente. En Costa Rica también se utiliza el término “*perfilado*” para referirse a este material.

Rehabilitación de un pavimento asfáltico: es el proceso por medio del cual la estructura de pavimento, es restaurada a su condición original de soporte o se genera mayor aporte estructural. Se obtiene de la recuperación con o sin estabilización, del pavimento existente en combinación con material de aporte si es necesario.

En este proceso, los materiales provenientes de los pavimentos existentes, formarán parte de la nueva estructura.

Reconstrucción de un pavimento asfáltico: se refiere a la acción de volver a construir un pavimento, removiendo la estructura existente.

Relleno mineral activo: es un agente que altera químicamente las propiedades de la mezcla con el objetivo de mejorar el desempeño del material. Los tipos más comunes son: cemento, cal hidráulica y cenizas volantes. La cantidad máxima permitida en la estabilización con asfalto es 1 %.

Tamaño máximo nominal de agregados: es el tamaño del tamiz inmediatamente superior al primero que retiene una cantidad superior a diez por ciento de peso.

3. ¿Qué son los materiales estabilizados con asfalto?

Los materiales estabilizados con asfalto, son materiales tratados con emulsión asfáltica o asfalto espumado. Son generalmente materiales granulares, materiales tratados previamente con cemento, mezclas asfálticas recuperadas (RAP) e inclusive pavimento recuperado que incluya capas subyacentes y/o materiales tratados para formar una nueva base o sub-base.

La incorporación de asfalto en la mezcla aumenta la resistencia al corte y disminuye la susceptibilidad al daño por humedad, como producto de la dispersión del asfalto en las partículas más finas del agregado. Cuando se utilizan las emulsiones asfálticas, éstas se dispersan preferentemente entre las partículas más finas, pero no exclusivamente, ya que algunas partículas gruesas son parcialmente recubiertas. Sin embargo, cuando se emplea asfalto espumado, éste se dispersa exclusivamente entre las partículas más finas, produciendo “puntos de soldadura” entre el mástico de las gotas de asfalto y las partículas finas de agregado (Asphalt Academy, 2009), en la Figura 1 se puede observar la diferencia en apariencia de este tipo de estabilizaciones.



Figura 1. Material estabilizado con emulsión asfáltica (izquierda) y con asfalto espumado (derecha) por Daniela Martínez Ortiz. 2019.

3.1. Antecedentes

El reciclaje en frío de pavimentos in situ utilizando asfalto es una técnica de construcción que recupera el pavimento flexible envejecido, añadiendo simultáneamente agentes estabilizadores para mejorar las propiedades del material recuperado (Gonzalez, Cubrinovski, Pidwerbesky, & Alabaster, 2012), y fue implementado desde hace más de 30 años en países como Sudáfrica y Estados Unidos. Desde entonces, se han propuesto diferentes metodologías de diseño para este tipo de material, las cuales tienen como común denominador, la evaluación de los materiales para analizar su comportamiento con respecto a la resistencia, durabilidad, fatiga, deformación permanente y trabajabilidad.

La Academia del Asfalto (Asphalt Academy, 2009) presenta una guía de diseño y construcción para materiales estabilizados con emulsión asfáltica y asfalto espumado. Esta guía da una serie de pautas a la hora de seleccionar los materiales adecuados para la estabilización con asfalto, como lo es la granulometría y el índice de plasticidad; también se considera la adición de cemento o cal en cantidades inferiores al 1 % para mejorar el desempeño de la mezcla. Para el diseño en laboratorio, se establecen niveles de diseño, según las cargas de tránsito a las que va a estar expuesto el pavimento.

La empresa alemana Wirtgen especializada en el reciclado de materiales publica su primer manual de reciclado en frío en el 2004, posteriormente, basado en la Guía de La Academia del Asfalto, publica en el 2012 su última versión del Manual de Reciclado en Frio (Wirtgen GmbH, 2012), en la cual se especifican ensayos triaxiales para la clasificación del material.

La presente guía se basa en los proyectos de investigación desarrollados sobre la metodología de diseño en materiales granulares estabilizados con asfalto espumado y emulsión asfáltica de (Ulloa, Múnera, & Ramírez, 2018) y (Ulloa & Múnera, 2018).

3.2. Principales características

Los materiales granulares estabilizados con asfalto se distinguen entre otros materiales por los siguientes elementos:

- El comportamiento es muy similar al de los materiales granulares sin estabilizar, sin embargo, se da un aumento significativo de la cohesión, permaneciendo casi constante el ángulo de fricción interna, que se evidencia en un aumento en la capacidad mecánica del material.
- Se obtiene mayor resistencia al daño por humedad y durabilidad.
- Adquiere resistencia a la flexión debido a las propiedades viscoelásticas del asfalto.
- Las partículas gruesas de agregado no están del todo recubiertas con asfalto. El asfalto se dispersa casi exclusivamente entre las partículas finas, resultando en un mástico rico en asfalto entre las partículas más gruesas.
- No tienen apariencia negra o adherente como las mezclas asfálticas en caliente. Existe un oscurecimiento leve del material después de estabilizar.
- El contenido de vacíos de una capa compactada es similar a la de la capa de material granular, y no de una carpeta asfáltica.
- Se logra reducir la viscosidad del asfalto, permitiendo que se mezcle con material granular a temperatura ambiente.
- El asfalto residual aplicado normalmente, no excede el 3 % sobre la masa de agregado seco. En muchas situaciones se adiciona relleno mineral activo como cemento o cal hidratada, lo cual además de aumentar la resistencia al daño por humedad y la rigidez del material, ayuda a dispersar el asfalto. El contenido de relleno mineral no debe exceder el 1 %, y tampoco debe exceder al porcentaje de asfalto residual (es decir, la relación del porcentaje de asfalto residual respecto al porcentaje de relleno mineral siempre debe ser mayor que 1). Si se coloca más de estos porcentajes recomendados, la estabilización con asfalto pierde las propiedades que se buscan inicialmente, y se convierte en otro tipo de estabilización.

- La reducción en el contenido de humedad durante el curado posterior a la compactación, conduce a un aumento en la resistencia a la tensión y a la compresión, así como a la rigidez de la mezcla.
- Para el buen desempeño de las mezclas estabilizadas con asfalto la compactación es fundamental, por lo que es necesario alcanzar la máxima densidad posible, debido a lo anterior se establece como mínimo requerido llegar al menos a un 98 % de compactación según la densidad máxima seca del Proctor modificado. En sitio se exige que el porcentaje de compactación de los dos tercios más bajos de la capa, no difiera del porcentaje de compactación promedio para la capa completa, en más de 2 % (Wirtgen, 2012).

3.3. Beneficios más evidentes del reciclado en frío para la rehabilitación de pavimentos



Factores medio ambientales. Se hace uso de hasta 100 % de los materiales del pavimento existente. Se reduce el uso de materiales nuevos y la creación de sitios para apilar los materiales. Además, el transporte de materiales es reducido en forma drástica. El consumo de energía total es reducido en forma considerable, así como el efecto destructivo de los vehículos de transporte en la red vial.



Calidad de la capa reciclada. Se logra una consistente calidad del mezclado de los materiales en planta o en sitio con el agua y los agentes estabilizadores.



Integridad estructural. El proceso de reciclado en frío produce capas ligadas gruesas que son homogéneas y no contienen interfaces débiles con otras capas más delgadas.



Menores tiempos de construcción. Las recicladoras son capaces de producir con altas tasas de rendimiento que reducen significativamente los tiempos de construcción comparados con métodos alternativos de rehabilitación. El reciclado en frío generalmente es una operación que requiere una sola pasada de máquina.



Recuperación de niveles de rasante. Al reciclar materiales del sitio es posible conservar los niveles de rasante existentes.

El reciclado en frío puede ser realizado en planta o in-situ, Figura 2. En planta, el reciclado se logra mediante el transporte del material recuperado de un pavimento existente a un depósito central, donde el material se trabaja con una unidad de procesamiento (como un mezclador continuo), se tiene la ventaja de poder controlar el material a estabilizar para lograr una mayor homogeneidad. In-situ, el reciclado se logra utilizando una máquina recicladora móvil. Estas recicladoras son especialmente diseñadas para lograr la capacidad de reciclar capas de pavimento de gran espesor en una sola pasada. En el Anexo A5 se describe con detalle el proceso de reciclado en frío en sitio.



Figura 2. Proceso de reciclado en sitio (izquierda) y proceso de reciclado en planta (derecha) (Wirtgen GmbH, 2012).

3.4 Mecanismos de falla

Según las condiciones propias del proyecto, aspectos como los materiales disponibles, agentes estabilizadores, técnicas constructivas, condiciones climáticas, entre otros, afectan el desempeño del material estabilizado y la forma en que éstos se deterioran. Existen dos mecanismos fundamentales de falla en los materiales estabilizados con asfalto: **deformación permanente y daño por humedad.**

La resistencia a la **deformación permanente** se puede mejorar por medio de:

- Materiales granulares con buena resistencia, angularidad, forma, rugosidad y dureza de los agregados.
- Incremento del tamaño máximo del agregado.
- Mejoramiento de la densidad en campo.
- Utilizar el contenido óptimo de humedad y no permitir el tránsito vehicular durante el curado inicial.
- Adición de una cantidad limitada de asfalto, usualmente menos de 3 %.
- Adición de relleno mineral activo hasta un máximo de 1 %.

La susceptibilidad al **daño por humedad** se puede mejorar por medio de:

- Aumento del contenido de asfalto limitado a aspectos como la estabilidad y costos.
- Aumento de relleno mineral activo hasta 1 %.
- Densidades en sitio mayores, mejorando la compactación.
- Uso de granulometría continua.

4. Materiales

4.1 Agregado

Los tratamientos con asfalto, usando emulsión asfáltica o asfalto espumado, son adecuados para la estabilización de un rango amplio de agregados, desde las gravas naturales hasta piedras trituradas bien graduadas y/o materiales recuperados. Preferiblemente en todos los casos con ausencia o bajos contenidos de materiales finos plásticos. Los materiales granulares clasificados como marginales, ya sea vírgenes o recuperados, han sido usados satisfactoriamente en este tipo de estabilización. Sin embargo, es importante establecer las tolerancias mínimas de aceptación para el material granular, como también identificar la composición óptima del agregado para el tratamiento con asfalto.

La calidad y la composición de los materiales recuperados de un pavimento existente pueden variar considerablemente (tipos de materiales, espesores de capas, bacheos, sellos asfálticos, etc.). Los porcentajes de RAP presentes en la mezcla pueden llegar hasta el 100 %. Sin embargo, es necesario considerar sus efectos sobre el material estabilizado, en especial cuando se utilice en sitios donde se superen los 6 millones de ESALs. Los posibles efectos de incluir altos contenido de RAP son: la reducción de la resistencia al corte debido a climas cálidos y la deformación acelerada debido a altos esfuerzos por sobre carga. Para lo cual, sería necesario incorporar entre un 15 % y 25 % de polvo de piedra al material para mejorar el desempeño del material ante estas características (Wirtgen, 2012).

Para determinar si la estabilización con asfalto será efectiva, se deben realizar dos ensayos fundamentales al material granular o perfilado: granulometría e índice de plasticidad (IP). Las graduaciones recomendadas para este tipo de estabilización se muestran en la Tabla 1 y Figura 3. Para la estabilización con asfalto se recomienda un IP menor a 10. No obstante, cuando el material posee un IP superior a 10, pero menor a 15, es posible pretratarlo con cal hidratada para reducir el IP, antes de la estabilización con asfalto. En la Tabla 2 se indican otros requisitos importantes para el material a estabilizar.

Tabla 1. Graduaciones de materiales para estabilización con asfalto

Tamiz		Porcentaje pasando cada tamiz (%)					
		Para asfalto espumado		Para emulsión asfáltica		Materiales típicos	
N°	mm	Límite grueso	Límite fino	Límite grueso	Límite fino	Grava	RAP
2"	50,0	100	100	100	100	100	100
1 1/2"	37,5	87	100	87	100	100	85
1"	25,0	76	100	76	100	100	72
3/4"	19,0	65	100	65	100	100	60
1/2"	12,5	55	90	55	90	100	50
3/8"	9,5	48	80	48	80	100	42
1/4"	6,7	41	70	41	70	100	35
N° 4	4,75	35	62	35	62	88	28
N° 8	2,36	25	47	25	47	68	18
N° 16	1,18	18	36	18	36	53	10
N° 30	0,600	13	28	12	27	42	6
N° 40	0,425	11	25	10	24	38	4
N° 50	0,300	9	22	8	21	34	3
N° 100	0,150	6	17	3	16	27	1
N° 200	0,075	4	12	2	10	20	0

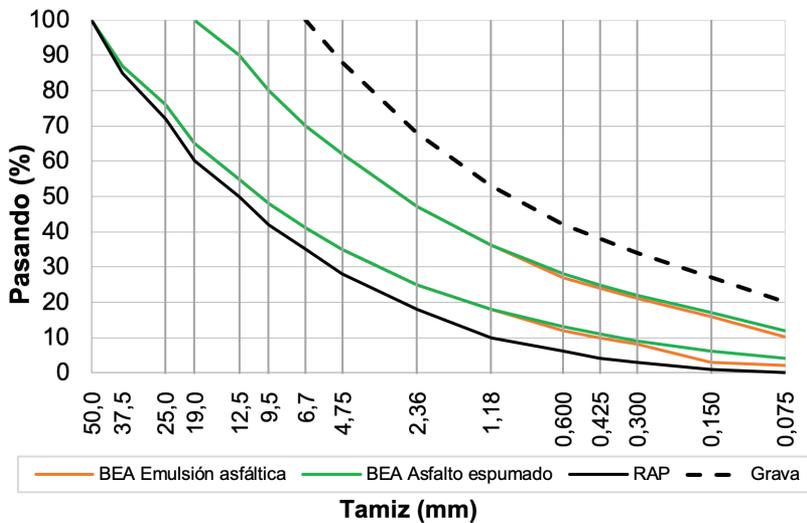


Figura 3. Graduaciones de materiales granulares para estabilizar con asfalto (Wirtgen, 2012).

Tabla 2. Requisitos de calidad en el agregado sin estabilizar

Ensayo	Norma	Unidades	Especificación
Índice de plasticidad	ASTM D 4318	%	10 máx.
CBR al 95 %	AASHTOT 193	%	20 mín.
Índice de durabilidad	ASTM D 3744	%	35 mín.
Abrasión de los Ángeles	ASTM C 535	%	50 máx.
Caras fracturadas	ASTM D 5821	%	50 mín.
Equivalente de arena	ASTM D 2419	%	30 mín.
Partículas friables	ASTM C142	%	No presencia
Presencia materia orgánica	ASTM C140	----	No presencia

4.2 Emulsión asfáltica

La emulsión asfáltica es una dispersión de asfalto en agua. El asfalto se mantiene en suspensión gracias a un agente emulsificante, el cual determina la carga eléctrica de la emulsión. Las emulsiones catiónicas tienen carga positiva y las aniónicas tienen carga negativa. Las emulsiones se fabrican en plantas especializadas, en la Figura 4 se observa el esquema de su producción.

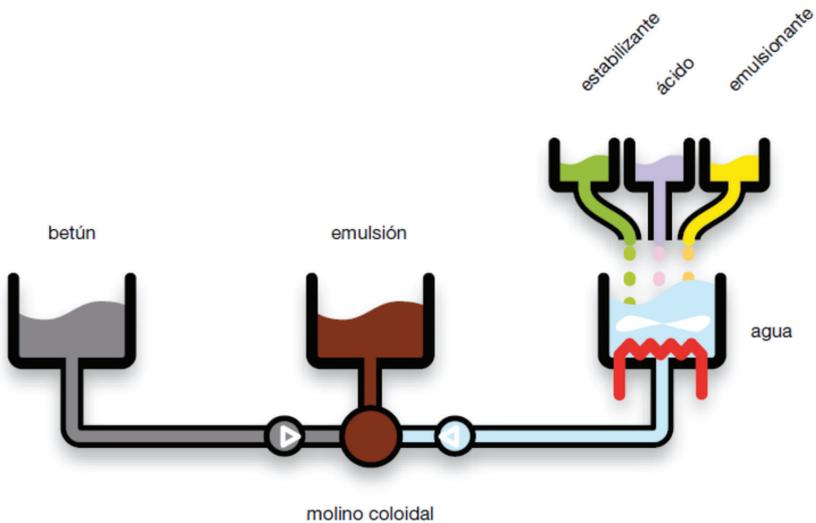


Figura 4. Producción de emulsión asfáltica (AkzoNobel, 2010).

Las emulsiones asfálticas más utilizadas en este tipo de aplicación son las de rompimiento lento. Estas emulsiones asfálticas facilitan su dispersión sobre el material granular, obteniéndose una buena trabajabilidad en un tiempo suficiente para que se dé todo su proceso constructivo. Las bases granulares tienen un contenido importante de finos, los cuales, por su alta superficie específica, requieren de este tipo de emulsiones, para que se dé un rompimiento adecuado de la misma.

La compatibilidad del agregado con la emulsión puede influir en el desempeño del material estabilizado. Existe la noción general de que las emulsiones catiónicas tienen mayor afinidad con los agregados silíceos y que las emulsiones aniónicas tienen mayor afinidad con los agregados alcalinos. Sin embargo, no siempre se cumple esta regla en la práctica.

Por lo tanto, es importante realizar las pruebas de afinidad correspondientes en cuanto a recubrimiento y adherencia para cada material al que se vaya a aplicar. Esto garantizará una adecuada trabajabilidad y desempeño en el campo.

En la siguiente tabla se detallan los parámetros de calidad requeridos para la emulsión asfáltica.

Tabla 3. Requisitos de calidad para la emulsión asfáltica (AASHTO, 2016)

Ensayo	Unidades	Norma	CSS-1	CSS-1h	SS-1	SS-1h
Viscosidad Saybolt Furol a 25 °C	SFS	AASHTO T 72	20-100	20-100	20-100	20-100
Estabilidad a 24 h	%	AASHTO T 59	1 máx.	1 máx.	1 máx.	1 máx.
Tamizado por malla N° 20	%	AASHTO T 59	0,10 máx.	0,10 máx.	0,10 máx.	0,10 máx.
Carga eléctrica	---	AASHTO T 59	Positiva	Positiva	Negativa	Negativa
Destilación, residuo	%	AASHTO T 59	57 mín.	57 mín.	57 mín.	57 mín.
Penetración a 25 °C, 100 g, 5s	1/100 mm	AASHTO T 49	100-250	40-90	40-90	100-250
Ductilidad, 25 °C, 5 cm/min	cm	AASHTO T 51	40 mín.	40 mín.	40 mín.	40 mín.
Solubilidad en tricloroetileno	%	AASHTO T 44	97,5 mín.	97,5 mín.	97,5 mín.	97,5 mín.
Recubrimiento y adherencia	%	MS-19	60 mín.	60 mín.	60 mín.	60 mín.

4.3 Asfalto espumado

El asfalto espumado consiste en calentar asfalto a una temperatura entre 155 °C y 175 °C, donde se mezcla con una pequeña cantidad de agua atomizada en una cámara de expansión y aire a una presión aproximada de 5 bares (100 kPa), tal como se muestra en la Figura 5. Cuando las partículas de agua entran en contacto con el asfalto caliente, la energía calórica del asfalto se transfiere al agua. Tan pronto como el agua alcanza su punto de ebullición, esta cambia de estado y al hacerlo, crea una burbuja con una delgada película de asfalto llena con vapor de agua (Wirtgen, 2004). El estado espumado del asfalto es temporal, durante este periodo baja su viscosidad, lo que permite mezclar con el agregado a una temperatura ambiente y con contenidos de humedad in-situ.

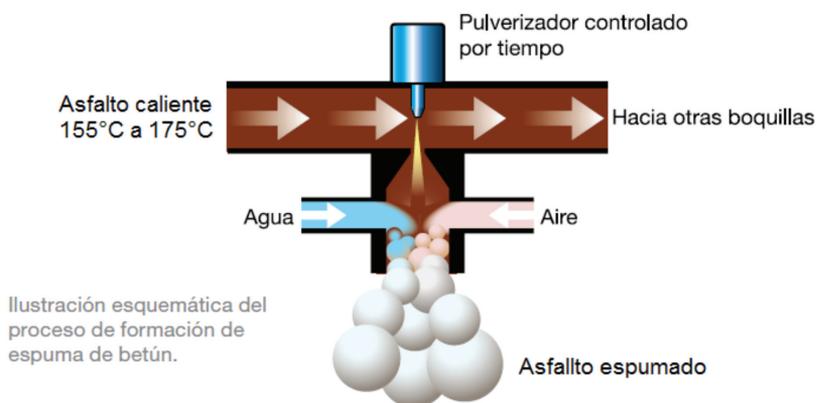


Figura 5. Producción de asfalto espumado (Wirtgen, 2012).

Las principales propiedades del asfalto espumado son:

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

Se debe añadir la cantidad de agua adecuada para obtener la vida media y razón de expansión óptimos, de acuerdo con los parámetros de calidad requeridos del asfalto original y espumado presentados en la Tabla 4. El asfalto apto para espumar es aquel que permita obtener las mejores características de expansión y vida media.

Tabla 4. Especificaciones para asfalto espumado (Wirtgen GmbH, 2012)

Temperatura del agregado	Tasa de expansión (veces)	Vida media, $\tau_{1/2}$ (segundos)
10 °C a 15 °C	10	8
Mayores a 15 °C	8	6
Penetración asfalto original (1/10 mm) (ASTM, 2013)	60 a 200	

Nota: se han utilizado exitosamente en otros proyectos asfaltos con grados de penetración inferiores, sin embargo, la calidad de la espuma disminuye conforme menos blando sea el asfalto.

4.4. Relleno mineral activo

El término de relleno mineral activo se usa para definir el relleno mineral que altera químicamente las propiedades de la mezcla. Generalmente se utiliza el cemento hidráulico y cal hidratada. El propósito de incorporar relleno mineral activo es:

- Mejorar la adhesión del asfalto con el agregado.
- Mejorar la dispersión del asfalto en la mezcla.
- Modificar la plasticidad de materiales naturales (reducir IP).
- Aumentar la rigidez de la mezcla y ganar resistencia.
- Acelerar el curado de la mezcla compactada.

Se pueden utilizar varios tipos de relleno mineral en una mezcla. La selección del tipo de relleno mineral adecuado depende de la disponibilidad, el costo y su desempeño con los componentes de la mezcla. En el diseño de mezcla de materiales estabilizados con asfalto, se determina la necesidad y el tipo del relleno mineral activo.

Los materiales con altos índices de plasticidad deberán ser pre-tratados con cal hidratada para disminuir su IP, siempre y cuando el IP sean menor o igual a 15.

4.5 Agua

Para el agua de mezclado y compactación se deben seguir, para este tipo de materiales, las mismas especificaciones de calidad del agua que tiene el concreto y otros materiales para caminos (Wirtgen, 2012).

Se debe evitar el uso de agua con impurezas, aunque se obtenga una buena espuma de asfalto, para evitar obstrucciones del sistema de inyección del asfalto.

5. Selección del tipo de agente estabilizador

Previo al inicio del proceso de diseño en laboratorio y con los resultados de la caracterización del material, se debe tomar en cuenta si el material es apto para ser estabilización con asfalto, y con esto lograr un adecuado desempeño. En la Figura 6 se ilustran los criterios a utilizar y cómo debe comprobarse que la estabilización con asfalto es la adecuada.

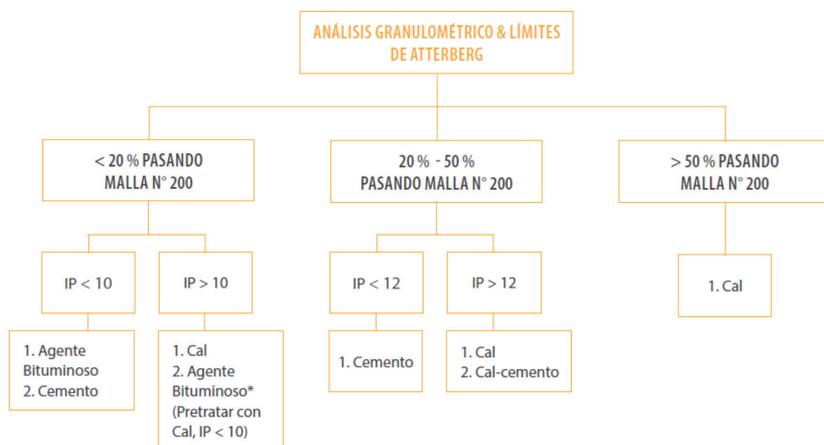


Figura 6. Selección del tipo de estabilización según informe (Ávila & Ulloa, 2017).

Como se puede ver en la Figura 6, la estabilización con asfalto es posible principalmente en materiales gruesos, si el índice de plasticidad (IP) es menor a 10. En aquellos casos que sea mayor a 10, es necesario pre-tratar el material con cal para disminuir el IP.

6. Diseño de mezcla para materiales estabilizados con asfalto

El procedimiento de diseño involucra una serie de pasos y ensayos que dependen de la importancia del camino y el volumen del tránsito de diseño. Como parte de los objetivos principales del diseño se tienen:

- Determinar si el tipo de ruta y el material existente es competente para ser estabilizado con emulsión asfáltica o asfalto espumado.
- Determinar la necesidad de adicionar relleno mineral activo en conjunto con el asfalto.
- Determinar las cantidades necesarias de asfalto residual y relleno mineral activo para una estabilización efectiva.
- Estudiar las propiedades mecánicas del material estabilizado, como un insumo para clasificar el material y el diseño de la estructura del pavimento.

En la Figura 7 se presenta un esquema del diseño del material estabilizado con asfalto.

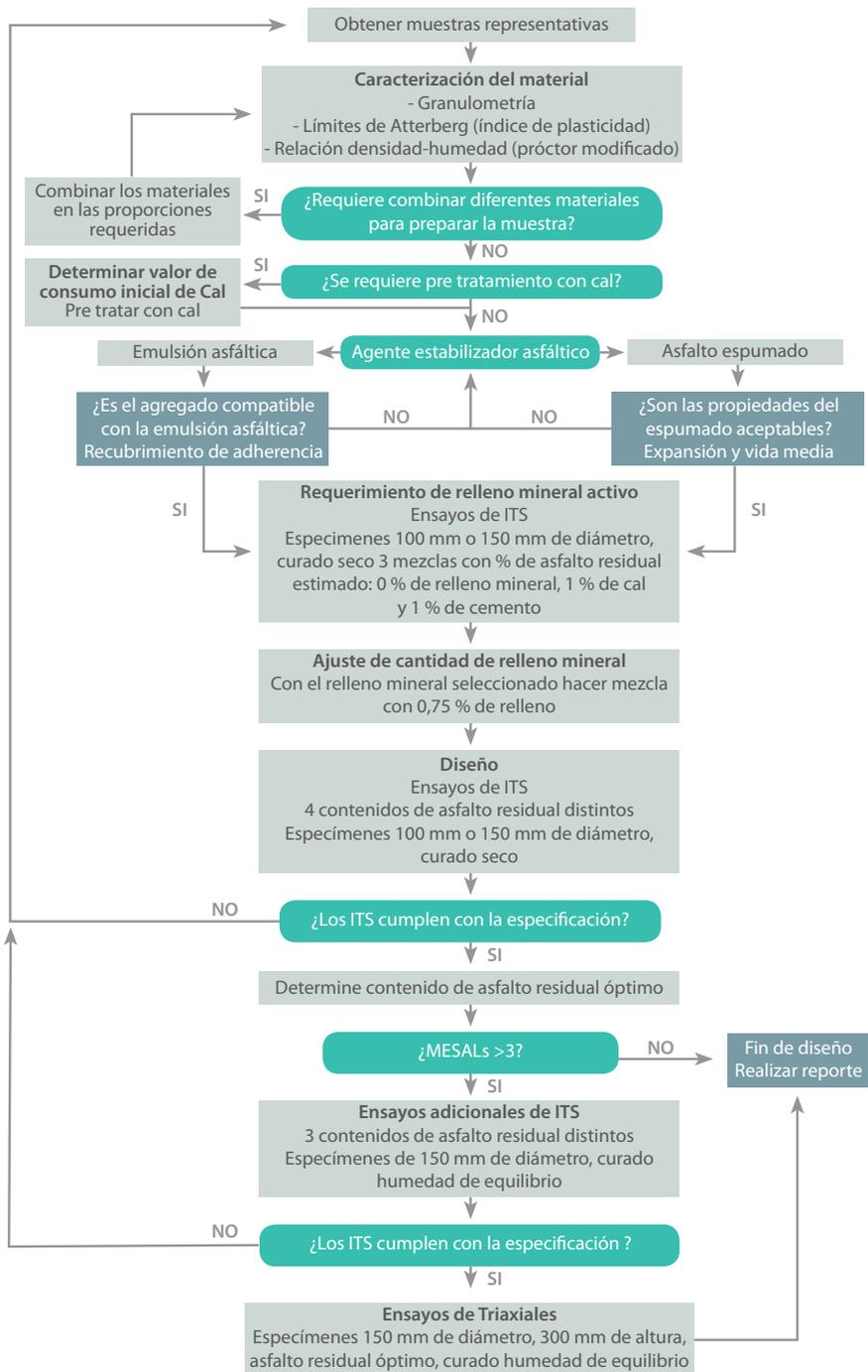


Figura 7. Esquema de diseño (Adaptado de Wirtgen GmbH, 2012).

A partir de los ensayos de laboratorio se determinará en cada fase del diseño la clasificación del material, antes y después de la estabilización con asfalto, de acuerdo con la calidad y resistencia del material, así como las cargas de tránsito esperadas.

De acuerdo con (Wirtgen, 2012) existen 2 clases de materiales estabilizados con asfalto

- **Clase 1:** Este material tiene alta resistencia al corte, y es típicamente utilizado como capa de base para un tráfico de diseño mayor de 3 millones de ESALS. Para esta clase de material sin tratar, la fuente es típicamente roca triturada bien graduada, pavimento asfáltico reciclado (RAP) o una mezcla de ambos.
- **Clase 2:** Este material tiene resistencia moderada al corte, y es típicamente utilizado como capa de base para un tráfico de diseño menor a 3 millones de ESALS. Para esta clase de material la fuente de material sin tratar es generalmente grava natural graduada, o una mezcla de varios materiales, entre ellos RAP.

La Tabla 5 resume los requerimientos de clasificación para los materiales estabilizados con asfalto.

Tabla 5. Clasificación de materiales estabilizados con asfalto (Wirtgen, 2012)

Ensayo	Unid.	Clase 1	Clase 2	No apto
		>3 MESALs	< 3 MESALs	
		Roca triturada bien graduada, RAP y/o mezclas de ambos	Gravas naturales graduadas, mezclas de varios materiales, RAP	Gravas pobres, suelos y materiales plásticos
Material estabilizado				
Resistencia a la tensión indirecta (ITS) (secas), especímenes 100 mm y 150 mm de diámetro	kPa	> 225	225 - 125	< 125
Resistencia a la tensión indirecta (ITS) (húmedas), especímenes de 100 mm y 150 mm de diámetro	kPa	> 100	100 - 50	< 50
Resistencia retenida tensión indirecta (TSR)	%	Mínimo 60		<60
Resistencia a tensión indirecta (ITS) (humedad de equilibrio), especímenes de 150 mm diámetro	KPa	> 175	175-95	< 95
Cohesión	kPa	> 250	> 50	< 50
Ángulo de fricción interna	°	> 40	> 25	< 25
Cohesión retenida	%	> 75	> 50	< 50
Material sin estabilizar				
Índice de Soporte California (CBR)	%	> 80	> 20	< 20
Índice de plasticidad (IP)		< 10	< 15	> 15

6.1 Muestreo

Previamente se debe conocer los espesores de cada capa, y las muestras se obtienen de la excavación de sondeos como parte de las investigaciones de campo (o de canteras donde se importan y estabilizan materiales nuevos). Cada capa del pavimento debe muestrearse por separado, y se requieren al menos 200 kg de material recuperado de cada capa, tal como se observa en el ejemplo de la Figura 8.

Los materiales de las capas superficiales que contengan asfalto (mezcla asfáltica, tratamientos superficiales, sellos de lechada asfáltica o materiales previamente estabilizados), deben ser pulverizados en sitio utilizando máquinas de fresado, o una recuperadora pequeña que permita obtener una graduación representativa de la que será utilizada posteriormente en la estabilización.

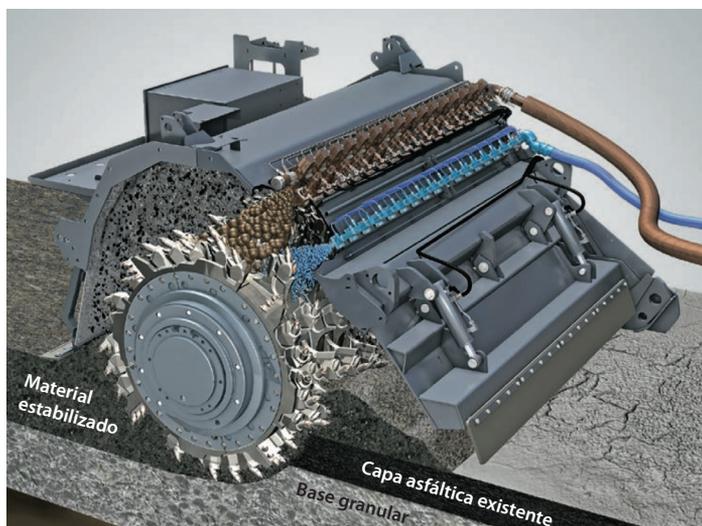


Figura 8. Ejemplo de capas de un pavimento a muestrear para la estabilización con asfalto (Wirtgen, 2012).

6.2 Ensayos preliminares

Realizar los siguientes ensayos sobre las muestras de cada capa individual (subbase, base, RAP, RAP combinado), fuente de material nuevo o la combinación de RAP (material recuperado de mezcla asfáltica) y parte de la base granular, según se requiera:

- Análisis granulométrico para determinar la graduación (ASTM C 136)
- Límites de Atterberg para determinar el índice de plasticidad (ASTM D 4318)
- Relación densidad-humedad (AASHTO T 180)

A continuación, se muestra una estimación de la cantidad de material que se requiere para cada ensayo:

Tabla 6. Cantidades de material según cada ensayo requerido

Ensayo	Masa de muestra requerida (kg)
Relación densidad-humedad (AASHTO T 180) y límites de Atterberg (AASHTO T 90 y T 89)	20
Granulometría y contenido de humedad	40

■ Ensayos para RAP

Cuando el material que se pretende estabilizar es 100% RAP, previo al diseño de mezcla es necesario verificar si el asfalto se encuentra activo o no, para lo cual se realizará el ensayo de resistencia a la tensión indirecta (tomando como norma base la AASHTO T 283), en especímenes de RAP de 100 mm de diámetro (al menos 3), compactados a 70 °C mediante el método Marshall a 75 golpes por cara. Los especímenes se deben acondicionar en agua a 25 °C durante 24 horas antes de la falla. Si el promedio de los valores obtenidos es mayor a 100 kPa, el asfalto dentro del RAP se considerará como activo. Para inactivar el asfalto en el RAP será necesario incorporar o sustituir una proporción del material con agregado triturado (tamaño máximo menor a 6,7 mm o a 20 mm según sea necesario) y cumplir con las especificaciones granulométricas de la Tabla 1. Verificar nuevamente si el asfalto se encuentra aún activo con el material combinado.

■ Combinación de muestras

En el caso que deban combinarse los materiales en el laboratorio, mezclar los materiales muestreados de diferentes capas del pavimento (reciclado) o de diferentes fuentes para obtener una muestra combinada representativa del material a estabilizar (Figura 9). Se debe considerar la densidad in situ de muestras de campo de las diferentes capas al mezclar los materiales, como se muestra a continuación.

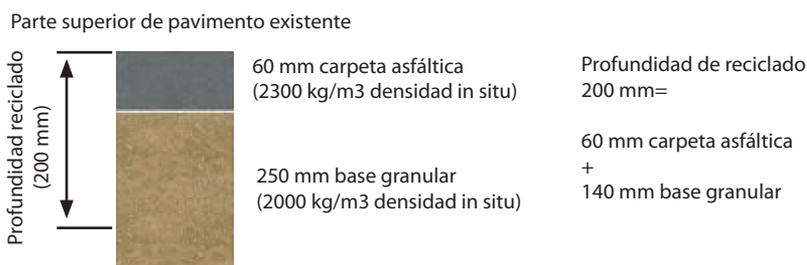


Figura 9. Proporciones de mezclado de materiales (Wirtgen, 2012).

Para obtener una mezcla representativa, los dos materiales del ejemplo anterior se deben combinar en la proporción del espesor de las capas a estabilizar y la densidad in situ como sigue (Tabla 7). El espesor por estabilizar estará en función del espesor en conjunto de las capas recuperadas y de la maquinaria a utilizar (ver anexo A.5 Construcción), donde se logre alcanzar las condiciones óptimas de densidad en todo ese espesor.

Tabla 7. Cálculo de cantidad de material según proporción en el pavimento

Material	Peso por metro cuadrado (kg)	Proporción	Para 50 kg de muestra
Mezcla asfáltica 60 mm, 2300 kg/m ³	0,06 x 2300 = 138	138/418 = 0,33	0,33 x 50000 = 16500
Grava 140 mm, 2000 kg/m ³	0,14 x 2000 = 280	280/418 = 0,67	0,67 x 50000 = 33500
Total	418	1,00	50000

6.3 Análisis del efecto de la plasticidad

Repetir los ensayos preliminares de granulometría, índice de plasticidad y relación densidad-humedad de la muestra combinada.

- **Si el IP > 15:** el material no debe utilizarse para la estabilización con asfalto.
- **Si el 10 < IP < 15:** Antes de continuar con la estabilización se debe pretratar con cal hidratada. La cantidad mínima de cal para pretratar el material se obtiene del ensayo según la norma ASTM D6276.

- **Si el IP < 10:** No hay necesidad de pre-tratar el material y puede continuar con la estabilización según el protocolo de diseño.

El pretratamiento de materiales con un IP > 10 requiere que la cal y el agua se incorporen al menos 2 horas antes de la adición de la emulsión asfáltica o del asfalto espumado. La mezcla pre-tratada se mantiene en un recipiente cerrado, para evitar la pérdida de humedad. Posteriormente, se comprueba el contenido de humedad y se ajusta de ser necesario antes de incorporar el asfalto. Si el material requirió pre-tratamiento con cal hidratada, podría no requerirse relleno mineral activo.

6.4 Conformación de la muestra

Para todos los ensayos de diseño en laboratorio se requiere eliminar los sobre tamaños que se retienen en la malla 19 mm (3/4"). Sin embargo, debe sustituirse ese porcentaje con material pasando 19 mm (3/4") y retenido en la malla 12,5 mm (1/2"), para compensar el tamaño eliminado. Asimismo, se divide el material en las siguientes fracciones (Wirtgen, 2012):

- Pasando la malla 19 mm (3/4") y retenido en la malla 12,5 mm (1/2").
- Pasando la malla 12,5 mm (1/2") y retenido en la malla 4,75 mm (No. 4).
- Pasando la malla 4,75 mm (No. 4).

El ejemplo de la Tabla 8 explica el procedimiento:

Tabla 8. Fracciones para conformar bache según granulometría

Fracciones según granulometría		Cantidad de material para un bache de 7000 g		
Tamaño (mm)	Pasando (%)	Pasando 4,75 mm	Pasando 12,5 mm Retenido 4,75 mm	Pasando 19,0 mm Retenido 12,5 mm
19,0	90,5	$\frac{53,5}{100} * 7000$ = 3752 g	$\frac{72,3 - 53,6}{100} * 7000$ = 1309 g	$\frac{90,5 - 72,3}{100} * 7000$ = 1309 g
12,5	72,3			
4,75	53,6			

Determinar el contenido de humedad higroscópica, según la norma ASTM D2216, de la muestra conformada y almacenar la muestra en un recipiente hermético o bolsa plástica para evitar variaciones en la humedad.

6.5 Humedad de mezclado

El contenido de humedad para la mezcla varía según el tipo de aplicación de asfalto y se define como sigue:

■ Emulsión asfáltica

Cuando se trabaja con emulsiones asfálticas, el “Contenido de Fluidos Totales” es utilizado en lugar del Contenido de Humedad óptimo al momento de definir la relación densidad-humedad. La densidad máxima se alcanza con el Contenido Óptimo de Fluidos Totales (COFT), y es la combinación del agua de compactación y emulsión asfáltica en la mezcla (Figura 10).

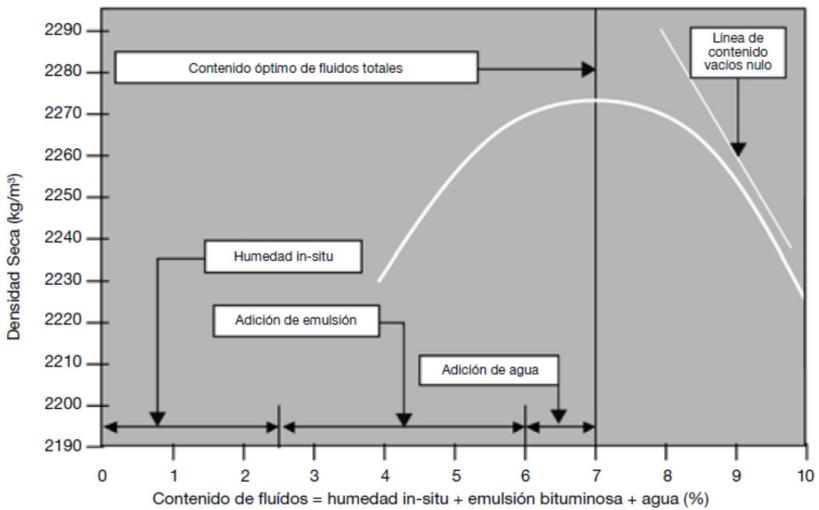


Figura 10. Esquema de fluidos totales (Wirtgen, 2004).

Nota: Determinar el porcentaje de emulsión asfáltica según la Tabla 9, y calcular la cantidad de emulsión según la masa seca del agregado.

El contenido óptimo de fluidos totales se determina adicionando un porcentaje constante de emulsión asfáltica mientras varía la cantidad de agua y se realiza el ensayo de relación densidad-humedad (Proctor Modificado, AASHTO T 180).

■ Asfalto espumado

Para la humedad de mezclado se debe utilizar como base el porcentaje de humedad que resulta en la máxima densidad seca. Este valor se encuentra en el rango del 70 % al 90 % del contenido óptimo de humedad (determinado con el Proctor Modificado) del material sin estabilizar.

6.6 Evaluación de las características del espumado y la adherencia del asfalto

■ Determinación de las propiedades de espumado

Las propiedades que caracterizan el asfalto espumado son la expansión y la vida media. El objetivo de la obtención de estas características, es determinar la temperatura y el porcentaje de agua que se requiere para producir las mejores propiedades de la espuma del asfalto, para una fuente particular de asfalto. Estas propiedades se miden a diferentes temperaturas, que van en un rango entre 155 °C y 175 °C.

Para la obtención de las propiedades se miden el volumen de expansión de la espuma del asfalto y el tiempo que tarda en llegar a la mitad de ese volumen, para incrementos de contenidos de agua inyectados al asfalto caliente. Se grafica cada propiedad según estas variaciones y se busca el valor del porcentaje de agua cuando la curva de vida media y la curva de máxima expansión corten los valores mínimos aceptables (6 segundos y 8 veces respectivamente). La mitad de esos dos valores será el contenido de agua óptimo para ese asfalto a la temperatura analizada, (Ver Figura 11, para temperatura de 160 °C).

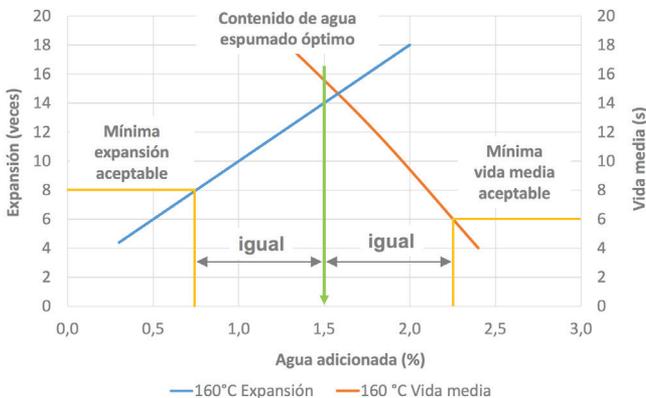


Figura 11. Determinación de las propiedades del asfalto espumado para una sola temperatura (Wirtgen GmbH, 2012).

Nota: La calibración del espumado, el flujo del agua y temperaturas requeridos para obtener la máxima expansión y vida media en cada asfalto analizado, dependerá de la planta de espumado utilizada en el laboratorio. En el Anexo A1 se indica el procedimiento empleado para la calibración del asfalto, utilizando el equipo con el que se cuenta actualmente en el LanammeUCR.

■ Adherencia y recubrimiento de la emulsión asfáltica

La evaluación preliminar de la emulsión asfáltica que se utilizará en el diseño implica la realización de los ensayos de recubrimiento y adherencia según el procedimiento descrito en el Manual Básico de Emulsiones Asfálticas, MS-19 (Asphalt Institute, 1998). Con estos ensayos se busca que la emulsión rompa de manera adecuada, permitiendo el recubrimiento del agregado, la dispersión en la mezcla y una buena trabajabilidad. Además, permite determinar si existe una adecuada adherencia y afinidad entre la emulsión y el agregado.

La prueba consiste en mezclar el material con agua y emulsión asfáltica (en ese orden), en la misma proporción determinada en el ensayo de Contenido Óptimo de Fluidos Totales. Luego esta mezcla se cura durante 24 horas a 60 °C, posteriormente se evalúa el recubrimiento de manera visual, empleando una cuadrícula en la que se contabilice el porcentaje de recubrimiento con respecto a una masa de 500 g.

Por otro lado, en el ensayo de adherencia (Figura 12) se toma una parte de esta mezcla ya curada, aproximadamente 100 g, y se coloca en agua hirviendo por un periodo de 3 minutos. Se seca y se evalúa nuevamente el recubrimiento.

*Tanto para el ensayo inicial de recubrimiento como para el de adherencia se espera un **porcentaje mínimo de recubrimiento de 60 %**.*

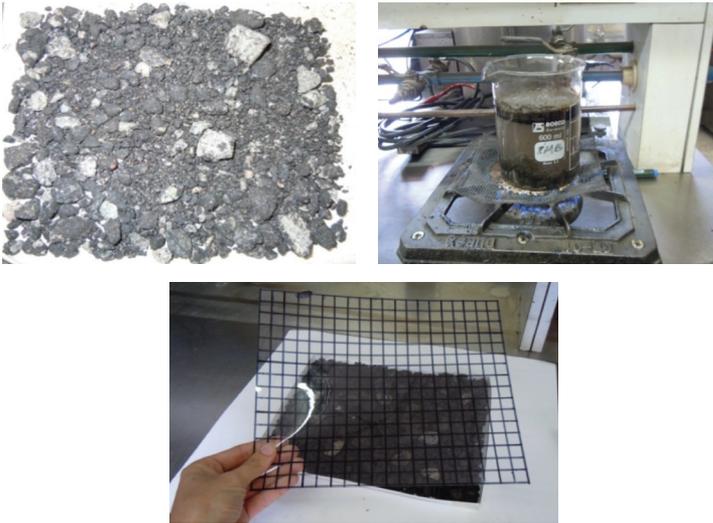


Figura 12. Ensayo de recubrimiento y adherencia.

6.7 Determinación del requerimiento de relleno mineral activo

Para determinar si se necesita la incorporación de un relleno mineral activo se deben preparar 3 mezclas: una con 0 %, otra con 1 % de cal hidratada y otra con 1 % de cemento. La cantidad de asfalto residual para las 3 mezclas se mantiene constante, y se estima por medio de la Tabla 9 utilizando los datos de la granulometría del material sin estabilizar.

Tabla 9. Estimación del porcentaje de asfalto inicial (Wirtgen GmbH, 2012)

Fracción pasando el tamiz N° 200 (%)	Adición de asfalto espumado % sobre peso seco de agregado		Material típico
	Fracción pasando el tamiz N° 4		
	< 50 %	> 50 %	
< 4	2,0	2,0	RAP
4 - 7	2,2	2,4	RAP/Piedra triturada graduada, gravas naturales, mezclas de las anteriores
7 - 10	2,4	2,8	
> 10	2,6	3,2	Gravas/arenas

Para las 3 mezclas se elabora un grupo de seis especímenes para fallarlos a tensión indirecta, estos se dividen en dos subgrupos: con acondicionamiento y sin acondicionamiento, de acuerdo a la sección 6.13 Preparación de especímenes para ensayo, de esta guía, y se calcula el porcentaje de resistencia retenida (TSR), el cual es un indicador de requerimiento de relleno mineral activo. Si la resistencia retenida de la mezcla sin relleno mineral activo es superior a 60 % y cumple con las resistencias individuales (ITS) de la Tabla 5, no es necesario adicionarlo. Los procedimientos de compactación, curado, acondicionamiento y falla se describen en las secciones 9.10 Fabricación de especímenes de ensayo de 100 mm de diámetro a la 9.14 Determinación de la resistencia a la tensión indirecta (ITS).

Cuando la resistencia retenida de la mezcla sin relleno mineral activo es menor a 60 %, se escogerá la mezcla con el tipo de relleno mineral activo (cal o cemento) que resulte con un TSR significativamente mayor al otro (> 5 %). Si los valores de TSR con ambos rellenos minerales activos están dentro del mismo orden, (diferencia < 5 %) cualquiera de los dos tipos de relleno mineral activo es adecuado, y se escogerá mediante un criterio económico o de disponibilidad.

■ Optimización del contenido de relleno mineral activo

Para optimizar la cantidad de relleno mineral activo en la mezcla, se pueden realizar ensayos adicionales en especímenes de 100 mm o 150 mm de diámetro con el relleno mineral activo, seleccionando una tasa de aplicación menor, por ejemplo: 0,5 % o 0,75 %. Sin embargo, se debe evitar comprometer la flexibilidad de la mezcla, utilizando un máximo de relleno mineral activo de 1 %.

■ Escogencia del contenido óptimo de asfalto

Una vez determinado el contenido y tipo de relleno mineral activo, se procede a optimizar el contenido de asfalto residual, dosificando diferentes contenidos de asfalto según el procedimiento de las secciones que comprenden desde la 6.8 Mezclado del material con asfalto, hasta la 6.17 Ensayo de módulo resiliente de materiales granulares.

6.8 Mezclado del material con el asfalto

El mezclado del material granular con asfalto espumado o emulsión asfáltica se prepara preferiblemente en mezcladoras tipo “pugmill” (Figura 13) u otro tipo de mezcladoras similares de laboratorio. El uso de estos equipos va orientado al tipo de mezclado que pueda tener el material en el campo o en plantas producción.



Figura 13. Mezcladora tipo “pugmill” (Wirtgen, 2012).

Paso

1

Colocar la masa requerida de muestra (entre 20 kg y 30 kg), como se preparó en la sección 9.4 Conformación de la muestra, en la mezcladora.

Paso

2

Calcule la masa seca de la muestra con la Ecuación 1.

$$M_{seca} = \frac{M_{seca\ al\ aire}}{1 + \left(\frac{\% H}{100}\right)} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde,

M_{seca} = Masa seca de la muestra, g

$M_{seca\ al\ aire}$ = Masa seca al aire de la muestra, g

% H = Porcentaje de humedad higroscópica, %

Paso

3

Calcule la masa requerida de relleno mineral activo (cal hidratada o cemento) a ser adicionada usando la Ecuación 2.

$$M_{\text{relleno}} = \frac{P_{\text{relleno}}}{100} \cdot M_{\text{seca}} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde,

M_{relleno} = Masa de relleno mineral activo, g

M_{seca} = Masa seca de la muestra, g

P_{relleno} = Porcentaje de relleno mineral activo, %

Paso

4

Mezcle el material y el relleno mineral activo por 60 s o hasta que la mezcla se vea homogénea.

Paso

5

Calcule el porcentaje de agua a ser adicionada para alcanzar la humedad de mezclado según cada tipo de estabilización:

Estabilización con asfalto espumado

La cantidad de agua de mezclado es la necesaria para alcanzar el 80 % del contenido óptimo de humedad:

$$P_{\text{agua mezclado}} = 0,80 \cdot \% \text{ Opt} - \% H \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde,

$P_{\text{agua mezclado}}$ = Porcentaje de agua de mezclado, g

$\% \text{ Opt}$ = Porcentaje óptimo de humedad, %

$\% H$ = Porcentaje de humedad higroscópica, %

La cantidad de agua de mezclado que se adiciona a la muestra se calcula con:

$$M_{\text{agua mezclado}} = \frac{P_{\text{agua mezclado}}}{100} \cdot (M_{\text{seca}} + M_{\text{relleno}})$$

Ecuación 4

Donde,

$M_{\text{agua mezclado}}$ = Masa de agua de mezclado, g

$P_{\text{agua mezclada}}$ = Porcentaje de agua de mezclado, g

M_{seca} = Masa seca de la muestra, g

M_{relleno} = Masa de relleno mineral activo, g

Después de mezclar, inspeccione la muestra para asegurarse que el material está en un estado “esponjado”.

Si se observa polvo, agregue pequeñas cantidades de agua (0.25 % cada vez) y vuelva a mezclar hasta que se logre un estado “esponjado” sin polvo visible.

Si el material se ve como “pegajoso” con una tendencia a acumularse contra el lado de la mezcladora, entonces el contenido de humedad es demasiado alto para mezclarlo con asfalto espumado. Rechazar la muestra. Comience de nuevo con otra muestra usando un contenido de humedad más bajo.

Paso

6

Calcule la cantidad requerida de asfalto residual.

$$M_{\text{asfalto}} = \frac{P_{\text{asfalto}}}{100} \cdot (M_{\text{seca}} + M_{\text{relleno}})$$

Ecuación 5

Donde,

M_{asfalto} = Masa de asfalto, g

P_{asfalto} = Porcentaje de asfalto, g

M_{seca} = Masa seca de la muestra, g

M_{relleno} = Masa de relleno mineral activo, g

Observe después del mezclado, que no queden hilos de asfalto o agregado grueso con capas de asfalto recubriéndolo, esto puede indicar un inadecuado espumado y mezclado con el material.

Paso

7

Adición del agua para compactación.

El cual corresponde al restante 20 % del contenido óptimo de humedad y mezcla por 60 s.

$$P_{\text{agua compactación}} = 0,20 \cdot \% \text{ Opt} - \% H \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde,

$P_{\text{agua compactación}}$ = Porcentaje de agua de compactación, g

$\% \text{ Opt}$ = Porcentaje óptimo de humedad, %

$\% H$ = Porcentaje de humedad higroscópica, %

La cantidad de agua de compactación que se adiciona a la muestra se calcula con:

$$M_{\text{agua compactación}} = \frac{P_{\text{agua compactación}}}{100} \cdot (M_{\text{seca}} + M_{\text{relleno}}) \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde,

$M_{\text{agua compactación}}$ = Masa de agua para la compactación, g

M_{seca} = Masa seca de la muestra, g

M_{relleno} = Masa de relleno mineral activo, g

Estabilización con emulsión asfáltica

La cantidad de agua de mezclado es la necesaria para alcanzar el Contenido Óptimo de Fluidos Totales:

$$M_{\text{agua mezclado}} = \left(\frac{(\% \text{ OFT} - \% H)}{100} \right) \cdot (M_{\text{seca}} + M_{\text{relleno}}) - M_{\text{emulsión}} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde,

$M_{\text{agua mezclado}}$ = Masa de agua para el mezclado, g

$\% \text{ OFT}$ = Porcentaje óptimo de fluidos totales, %

$\% H$ = Porcentaje de humedad higroscópica, %

M_{seca} = Masa seca de la muestra, g

M_{relleno} = Masa de relleno mineral activo, g

$M_{\text{emulsión}}$ = Masa de emulsión asfáltica, g

Paso

6

Agregue el agua de mezclado y mezcle junto con el material y el relleno mineral activo por 60 s o hasta que la mezcla se vea homogénea.

Paso

7

Calcule la cantidad requerida de asfalto residual.

$$M_{emulsión} = \frac{P_{asfalto}}{P_{asfalto\ en\ emulsión}} \cdot M_{seca} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde,

$M_{emulsión}$ = Masa de emulsión asfáltica, g

M_{seca} = Masa seca de la muestra, g

$P_{asfalto}$ = Porcentaje de asfalto residual en la mezcla, %

$P_{asfalto\ en\ emulsión}$ = Porcentaje de asfalto residual en la emulsión asfáltica, %

Paso

8

Incorpore la emulsión asfáltica a la mezcladora en movimiento y mezcle por 60 s o hasta que la mezcla se vea homogénea.

Finalmente, tanto para asfalto espumado como para emulsión asfáltica, continúe con el Paso 9 y 10.

Paso

9

Transfiera el material recién mezclado dentro de un contenedor sellado para evitar la pérdida de humedad. Para minimizar la pérdida de humedad compacte los especímenes a la mayor brevedad posible.

Paso

10

Repita el mismo proceso para al menos 4 mezclas con diferentes contenidos de asfalto, a intervalos de 0,5 %.

Por ejemplo:

Si la muestra consiste en una mezcla de RAP con agregado triturado, con 39 % pasando el tamiz de 4,75 mm y 8 % pasando el tamiz de 0,075 mm, según la Tabla 9, el contenido teórico óptimo de asfalto es 2,4%. El contenido de asfalto espumado para cada muestra (con el mismo contenido de relleno mineral y de humedad) sería:

Muestra 1: 1.5 %

Muestra 2: 2.0 %

Muestra 3: 2.5 %

Muestra 4: 3.0 %

6.9 Compactación en laboratorio

La densidad que se logre en la compactación es de vital importancia para el desempeño final del material. Usualmente se especifica la densidad mínima como un porcentaje de la densidad del Proctor Modificado, entre 98 % y 102 % para bases estabilizadas con asfalto.

El método de compactación que se emplee en el laboratorio deberá reproducir lo mejor posible la densidad en el campo, así como la orientación de las partículas después de la compactación. En la Tabla 10 se resumen los métodos y equipos de compactación más utilizados para este tipo de materiales, según el nivel de diseño y los requerimientos de tránsito.

Los especímenes de 150 mm de diámetro pueden sustituirse por otros de 100 mm de diámetro para obtener los mismos valores. Sin embargo, cuando se trata de un material grueso, (es decir, donde la curva de granulométrica tiende hacia el lado grueso de la especificación recomendada) se recomienda la compactación de especímenes de 150 mm de diámetro en lugar de las muestras de 100 mm de diámetro. Para el nivel de diseño 2, sólo se utilizan muestras de 150 mm de diámetro para determinar los valores de tensión indirecta con humedad de equilibrio.

Los procedimientos de compactación descritos a continuación son procedimientos estándar bien reconocidos que pueden llevarse a cabo en la mayoría de los laboratorios, en todo el mundo. Se pueden usar otros procedimientos (por ejemplo, compactación giratoria, martillo

vibratorio, mesa vibratoria, etc.) siempre que alcancen entre un 98 % y 100 % de la densidad máxima seca según AASHTO T 180 modificado para especímenes de 150 mm de diámetro.

Tabla 10. Métodos de compactación en la estabilización de materiales con asfalto (Wirtgen GmbH, 2012), (Pennsylvania Department of Transportation, 2012)

Método de compactación	Tamaño de especímenes	Equipo	Características de la compactación
Marshall	100 mm de diámetro y 63,5 mm de altura	Compactador Marshall	75 golpes por cara
Proctor Modificado	150 mm de diámetro y 95 mm de altura	Mazo Proctor modificado	4 capas ⁽¹⁾ con 55 golpes por capa
Superpave	150 mm de diámetro y 95 mm de altura	Compactador giratorio	30 giros, una presión de 600 kPa y un ángulo de 1,25° o compactar por altura
Vibración	150 mm de diámetro y 95 mm de altura	Martillo vibratorio	2 capas de 47,5 mm Tiempo máximo de compactación 120 segundos

⁽¹⁾ La altura del espécimen (95 mm) es menor a la del Proctor (116 mm), por lo tanto, se justifica el uso de menos capas.

6.10 Fabricación de especímenes de ensayo de 100 mm de diámetro

Se compactan al menos 6 especímenes de 100 de diámetro, con una altura de 63,5 mm, para cada muestra, con compactación Marshall a 75 golpes por cara. A continuación, se describe el procedimiento para fabricación de especímenes:

Paso



Prepare el molde y mazo, limpiando el molde, collarín y base, así como la cara de compactación del mazo. Estos deben estar a temperatura ambiente.

Paso**2**

Pese suficiente cantidad de material para alcanzar una altura de $(63,5 \pm 1,5)$ mm (aproximadamente 1100 g para la mayoría de materiales). Coloque un filtro de plástico para evitar que la mezcla se pegue a la base. Introduzca el material en el molde, e introduzca 15 veces la espátula con alrededor del perímetro, y 10 veces en el centro, dejando la superficie con un montículo con las partículas más gruesas. Coloque otro filtro plástico encima del material para evitar que la mezcla se pegue a la cara de compactación del mazo.

Paso**3**

Compacte con 75 golpes por cara en caída libre con el mazo Marshall.

Paso**4**

Remueva el molde, collarín y base del pedestal de compactación y coloque en una mesa. Retire el collarín y el filtro plástico, marque e identifique el espécimen compactado. Dar vuelta al molde y remover el otro filtro plástico, en esta misma posición, quite la base y deje el espécimen dentro del molde por 24 horas, para que gane suficiente resistencia, antes de extraer. Esto se debe hacer en especial cuando la mezcla posea partículas muy gruesas y en el proceso de extracción el espécimen se pueda dañar. Mida el espécimen para comprobar que cumpla con la altura requerida dentro de los límites de $\pm 1,5$ mm, sino, ajuste la cantidad de mezcla en una nueva compactación.

Paso**5**

Tome una muestra de ± 1000 g después de la compactación del segundo y quinto espécimen, seque y lleve a masa constante. Determine el contenido de humedad de compactación según la ecuación 10:

$$\% H_{comp} = \frac{M_{w+c} - M_{d+c}}{M_{d+c} - M_c} \cdot 100 \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde,

M_{w+c} = Masa húmeda de la muestra más contenedor, g

M_{d+c} = Masa seca de la muestra más contenedor, g

M_c = Masa de contenedor, g

$\%H_{comp}$ = Porcentaje de humedad de compactación, %

Paso

6

Repita del paso 1 al 5 para fabricar al menos 6 especímenes.

6.11 Fabricación de especímenes de ensayo de 150 mm de diámetro

Se fabrican un mínimo de seis 6 especímenes de 150 mm de diámetro y 95 mm de altura, a partir de cada muestra de material tratado aplicando el esfuerzo de compactación según el ensayo de Proctor Modificado AASHTO (T-180), como se describe en los siguientes pasos:

Nota: El método que mejor representa las propiedades del material compactado en campo es mediante el martillo vibratorio, en el Anexo A.1 se describe el procedimiento para la fabricación de especímenes para este método de compactación.

Paso

1

Prepare el equipo limpiando el molde, el collarín, la placa base y la cara del mazo de compactación. Coloque un filtro de plástico para evitar que la mezcla se pegue a la base.

Se pueden usar moldes partidos o moldes estándar "Proctor", cada uno equipado con un espaciador de 32 mm colocado en la placa base para lograr muestras de 95 mm ($\pm 1,5$ mm de altura).

Paso

2

Compactar cada espécimen aplicando 55 golpes por capa (4 capas aproximadamente de 25 mm de espesor). Después de la compactación escarificar, tal cual se realiza en el procedimiento del ensayo de Proctor modificado de la norma AASHTO T 180.

Paso

3

Para las capas de 2 a 4, si es necesario, ajuste la cantidad de material de tal manera que se obtenga la altura requerida. Utilizar un cuchillo o espátula para escarificar la superficie de la capa compactada hasta una profundidad de ± 10 mm para asegurar una buena adherencia entre capas.

Paso

4

Enrase cuidadosamente el exceso de material como se describe en el método AASHTO T 180.

Paso

5

Después de la compactación, retire el molde de la placa base y extraiga la muestra por medio de un equipo de extrusión. Donde se utilicen moldes partidos, separe los segmentos y retire la muestra.

Nota: Los materiales gruesos a menudo se dañan durante el proceso de extrusión. Por lo tanto, se recomienda que las muestras se dejen en sus moldes durante 24 horas, permitiendo que se desarrolle suficiente resistencia antes de la extracción. Cuando se usan moldes partidos, es recomendable dejar la muestra en el molde durante 4 horas antes de dividir el molde y extraer la muestra.

Paso

6

Tome una muestra de ± 1000 g después de la compactación del segundo y quinto espécimen, seque y lleve a masa constante. Determine el contenido de humedad de compactación según la Ecuación 10.

Paso

7

Repita del paso 1 al 6 para fabricar al menos 6 especímenes.

6.12 Curado de especímenes

El curado de materiales estabilizados con asfalto, es el proceso mediante el cual, la capa mezclada y compactada pierde humedad a través de la evaporación, repulsión del agua por parte del asfalto y la expulsión del agua por efecto de la disipación de presión de poro inducida por la compactación (Wirtgen GmbH, 2012).

La reducción del contenido de agua durante el curado va aumentando la resistencia y la rigidez de la mezcla, por lo que este factor se debe reproducir lo mejor posible en el diseño de laboratorio.

A continuación, se describen dos procedimientos de curado. El primero es un procedimiento estándar para secar las muestras a masa constante. El segundo procedimiento tiene como objetivo simular las condiciones de campo donde el "contenido de humedad de equilibrio" es aproximadamente el 70 % del contenido óptimo de humedad. Las muestras de 100 mm y 150 mm de diámetro pueden curarse en seco (hasta masa constante), mientras que solo las muestras de 150 mm de diámetro pueden curar con un contenido de humedad de equilibrio.

■ Curado seco

Después de la compactación, colocar las muestras (de 100 mm o 150 mm de diámetro) en un horno de aire forzado a 40 °C y curarlas a masa constante por 72 horas o menos, hasta obtener menos de 1% de humedad. Cuando se logre una masa constante, retire las muestras del horno y deje que se enfríen a 25 °C ($\pm 2,0$ °C).



Figura 14. Curado seco.

■ Curado para simular las condiciones de campo

Después de la compactación, deje las muestras de 150 mm de diámetro a temperatura ambiente por 24 horas, luego coloque en un horno de aire forzado a 30 °C por 1 h y compruebe una reducción en la humedad de $70 \% \pm 5 \%$ del contenido óptimo de humedad, repita el procedimiento de secado a intervalos de 1 hora hasta alcanzar la humedad de equilibrio, Figura 15.



Figura 15. Curado por humedad de equilibrio.

Para calcular de forma aproximada el contenido de humedad en el espécimen, justo después de la compactación pese y anote esta masa, esta sería la masa húmeda de la muestra. Con el contenido de humedad de compactación determine el peso seco de la muestra como sigue:

$$M_{seca} = \frac{M_{húmeda}}{1 + \frac{\% H_{comp}}{100}} \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde,

M_{seca} = Masa seca teórica del espécimen, g

$M_{húmeda}$ = Masa húmeda teórica del espécimen, g

$\%H_{comp}$ = Porcentaje de humedad de compactación, %

El contenido de humedad aproximado sería:

$$\% H_{\text{aprox}} = \frac{M_{\text{húmeda}} - M_{\text{seca}}}{M_{\text{seca}}} \cdot 100 \quad \text{Ecuación 12}$$

Una vez que el espécimen alcanza la humedad de equilibrio, colóquelas en una bolsa plástica sellada (al menos el doble del volumen del espécimen) y vuelva a colocar en el horno a 40 °C durante 48 horas más. Después de este periodo deje enfriar a 25 °C ± 2,0 °C.

6.13 Preparación de especímenes para ensayo

Después de enfriar, determine la densidad bruta de cada espécimen usando el siguiente procedimiento:

Paso

1

Determine la masa de la muestra.

Paso

2

Mida la altura de la muestra en cuatro ubicaciones espaciadas uniformemente alrededor de la circunferencia y calcule la altura promedio de la muestra.

Paso

3

Mida 4 veces el diámetro de la muestra y calcule su promedio.

Paso

4

Calcule la densidad aparente de cada muestra usando la Ecuación 13.

$$D_{\text{bruta}} = \frac{4 \cdot M_{\text{especimen}}}{\pi \cdot h \cdot d^2} \cdot 1\,000\,000 \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde,

D_{bruta} = Densidad bruta del espécimen compactado, kg/m³

$E_{\text{especimen}}$ = Masa del espécimen compactado, g

h = Altura promedio del espécimen compactado, mm

d = Diámetro promedio del espécimen compactado, mm

Excluya cualquier espécimen cuya densidad bruta difiera de la densidad bruta promedio en más de un 2,5 %.

Paso

5

Acondicionamiento: coloque la mitad de las muestras (normalmente 3) en un baño con agua durante 24 horas a $25\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$. Después de 24 horas, retire las muestras del agua, seque la superficie y realice el ensayo de ITS inmediatamente.

6.14 Determinación de la resistencia a la tensión indirecta (ITS)

El ITS se determina mediante el ensayo AASHTO T 283 modificado donde se mide la carga de falla aplicada en especímenes sobre su eje diametral a una tasa de deformación constante de 50,8 mm / minuto (Figura 16). Asegurarse de que la temperatura de los especímenes sea de $25\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ y siga el procedimiento que se describe a continuación:



Figura 16. Falla a tensión indirecta.

Paso

1

Coloque el espécimen sobre la muela de carga (asegurarse que las muelas de carga sean las adecuadas según el diámetro del espécimen). Coloque la muestra de manera que las muelas de carga estén paralelas y centradas en el plano diametral vertical.

Paso

2

Coloque la muela de carga superior, coloque y centre debajo del pistón de carga del dispositivo de prueba de compresión.

Paso

3

Aplique la carga a la muestra, sin descarga, a una velocidad de avance de 50,8 mm por minuto hasta alcanzar la carga máxima.

Paso

4

Registre la carga máxima P (en kN), con una precisión de 0,1 kN.

Paso

5

Registre el desplazamiento de falla al 0,1 mm más cercano.

Paso

6

Rompa la muestra por la mitad y registre la temperatura de la muestra en su centro.

Paso

7

Rompa al menos uno de los especímenes no acondicionados y seque a $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta masa constante. Determine el contenido de humedad curada utilizando la Ecuación 14.

$$\%H_{\text{especimen}} = \frac{M_{\text{húmeda}} - M_{\text{seca}}}{M_{\text{seca}}} \cdot 100 \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde,

M_{seca} = Masa seca teórica del espécimen, g

$M_{\text{húmeda}}$ = Masa húmeda teórica del espécimen, g

$\%E_{\text{especimen}}$ = Porcentaje de humedad del espécimen, %

Determine la densidad bruta seca de cada espécimen usando la Ecuación 15

$$D_{\text{bruta seca}} = D_{\text{bruta}} \cdot \left(1 - \frac{\%H_{\text{especimen}}}{100}\right) \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde,

$D_{bruta\ seca}$ = Densidad bruta seca del espécimen compactado, kg/m^3

D_{bruta} = Densidad bruta del espécimen compactado, kg/m^3

$\%H_{especimen}$ = Porcentaje de humedad del espécimen, %

Paso

8

Repita el paso 7 con al menos una de los especímenes acondicionados. Determine el contenido de humedad después del acondicionamiento utilizando la Ecuación 14.

Paso

9

Calcule el valor de ITS para cada muestra al 1 kPa más cercano usando la Ecuación 16.

$$ITS = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot h \cdot d} \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde,

ITS = Resistencia a la tensión indirecta, kPa

P = Máxima carga aplicada, Kn

h = Altura promedio del espécimen, mm

d = Diámetro promedio del espécimen, mm

Paso

10

Calcule porcentaje de resistencia retenida TSR usando la Ecuación 17.

$$TSR = \frac{ITS_{sin\ acond}}{ITS_{con\ acond}} \cdot 100 \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde,

TSR = Resistencia retenida a la tensión indirecta, %

$ITS_{sin\ acond}$ = Resistencia a la tensión indirecta sin acondicionamiento, kPa

$ITS_{con\ acond}$ = Resistencia a la tensión indirecta con acondicionamiento, kPa

6.15 Resultados del diseño de mezcla

Grafique los respectivos resultados de los ensayos de ITS con y sin acondicionamiento, contra la adición de asfalto residual, como se muestra en el siguiente ejemplo. Si se obtuvieron los resultados de dos procedimientos de curado diferentes, cada uno debe representarse en un gráfico separado.

El porcentaje de asfalto residual óptimo se obtiene a partir del gráfico donde exista un incumplimiento en algún punto del ITS seco, ITS acondicionado o de la TSR para la clasificación requerida del material, según Tabla 5. En caso de que todos los puntos cumplen con el mínimo, aplicar el criterio de ingeniería para lograr un nivel de confianza suficiente, en función de la variabilidad de los resultados de ensayo, de la economía y viabilidad de utilización de la técnica.

En la Tabla 11 y en la Figura 17 se muestran los resultados de un diseño de material estabilizado con emulsión asfáltica, utilizando especímenes de 100 mm de diámetro. Las resistencias a la tensión indirecta de especímenes con y sin acondicionamiento cumplen para un material Clase 1 según la Tabla 5. El criterio entonces para seleccionar el contenido óptimo de asfalto residual es la resistencia retenida, que en este caso se seleccionó el contenido de asfalto residual en el punto más alto de la curva del TSR, 3,3 %.

Tabla 11. Resultados del diseño de material reciclado estabilizado con emulsión asfáltica

Asfalto residual	Densidad	Compact.	ITS sin acond	ITS acond a 25°C	TSR
%	kg/m ³	%	kPa	kPa	%
2,5	1944	98,9	577,4	435,4	75,4
3,0	1931	98,9	550,8	454,2	82,5
3,5	1913	98,8	487,6	394,2	80,9
4,0	1915	98,9	462,1	367,0	79,4

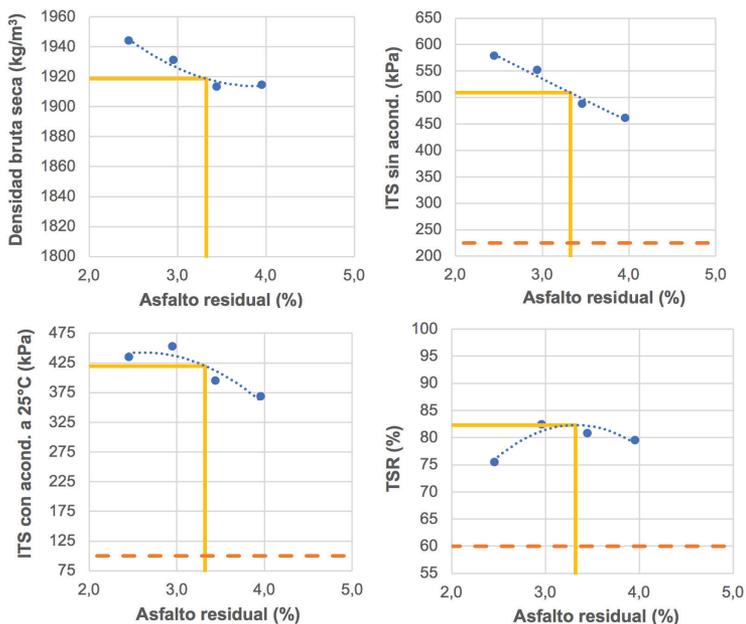


Figura 17. Gráficas de diseño para el material granular estabilizado con asfalto espumado.

6.16 Ensayo triaxial para las propiedades de corte

La cohesión y el ángulo de fricción son propiedades mecánicas intrínsecas de los materiales granulares, los cuales dan criterios para evaluar la calidad del mismo. Estas variables se determinan mediante el ensayo triaxial estático de acuerdo con el protocolo *BSM Cold Recycling* del catálogo Wirtgen 2017. Los valores recomendados para el ensayo de resistencia al corte se presentan en la Tabla 5.

A partir del contenido óptimo de asfalto residual en la mezcla, obtenido en el nivel de diseño, se realizan ensayos de resistencia al corte en la cámara triaxial.

El ensayo de triaxial estático se realiza en especímenes en condición de humedad de equilibrio, a diferentes esfuerzos de confinamiento: 0 kPa, 50 kPa, 100 kPa y 200 kPa. Donde se determinan los parámetros de cohesión C y ángulo de fricción interna ϕ . Esto con el objetivo de clasificar el material de manera más confiable, y poder generar las razones de esfuerzos desviadores en caso de ser necesarios para una

posterior evaluación de la deformación permanente en el material en el laboratorio. Además, se efectúa el ensayo de triaxial estático a 100 kPa de confinamiento para especímenes acondicionados en agua a 25 °C por 24 horas para determinar un porcentaje de cohesión retenida.

En el Anexo A3 se detalla la preparación de los especímenes y el equipo para llevar a cabo este ensayo.

6.17 Ensayo de módulo resiliente de materiales granulares

El ensayo para la determinación del módulo resiliente en materiales granulares y suelos se establece en los procedimientos en el *Appendix 2. Recommended standard method for routine resilient modulus testing of unbound granular base/subbase materials and subgrade soils* del documento *Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design* de la NCHRP (por sus siglas en inglés, National Cooperative Highway Research Program) Number 285, y en la norma AASHTO T 307, los cuales se usan para simular las condiciones reales del pavimento. Estos sirven para medir la rigidez y la habilidad que tiene el material de soportar la deformación permanente acumulada por las cargas, absorción y la expansión del material.

En este ensayo el material se somete a una serie de cargas axiales por un periodo muy corto de tiempo y entre cargas se da un periodo de reposo, esto con el fin de simular el paso del tránsito por el pavimento. Al mismo tiempo se aplica una presión de confinamiento constante, que simula los esfuerzos laterales causados por el peso del material que está por encima, más las cargas de tránsito. En el laboratorio esta presión de confinamiento se representa a través de aire comprimido dentro de la cámara triaxial. Con los resultados obtenidos a través de este ensayo es posible llevar a cabo el diseño mecánico del pavimento.

7. Referencias

- AksoNobel. (2010). *Emulsiones Asfálticas*. Ámsterdam: Askonobel.
- Asphalt Institute. (1998). *A Basic Asphalt Emulsion Manual (MS-19)*. Lexington, Kentucky, Estados Unidos: Asphalt Institute
- Ávila, T. & Ulloa, A. (2017). *Guía para la selección de agentes estabilizadores para suelos y materiales granulares*. LM-PI-UMP-055-R1. PITRA, LanammeUCR. Universidad de Costa Rica.
- Collings, D.; Grobler, J.; Hughes, M.; Jenkins, K.; Jooste, F.; Long, F. & Thompson, H. (2009). *Technical Guidline: Bitumen Stabilised Material*. Asphalt Academy, Pretoria. (2).
- González, A.; Cubrinovki, M.; Pidwerbesky, B. & Alabaster, D. (2012). *Desempeño de pavimentos estabilizados con asfalto espumado en una prueba de pavinomientos a escala real y carga acelerada*. Revista ingeniería de construcción, Santiago, Chile. 27(2), pp 05-17.
- Kelfkens, R. W. C. (2008). *Vibratory hammer compaction of bitumin stabilized*. Tesis Doctoral, Stellenbosch University.
- National Cooperative Highway Research Program. (2005). *Laboratory determination of resilient modulus for flexible pavement design*.
- Morian, D. A; Solaimanian, M.; Scheetz, B. & Jahangirnejad, S. (2012). *Developing standars and specifications for full depth pavement reclamation* (No. FHWA-PA-2012-004-090107). Dept. of Transportation, Pennsylvania.
- South African Bureau of Standards. (2018). *Part BSM5: Determination of the shear properties of bitumen stabilized material (Triaxial test)*. SABS Standards Division. Pretoria, South Africa.
- The Gorman Group, LLC. (s.f). *Gorman Roads*. Recuperado el 09 de julio de 2019, de Gorman Group: <http://www.gormanroads.com/products-services/construction-services/full-depth-reclamation>.

- Ulloa, A.; Múnera, J. (2018). *Metodología de diseño de materiales granulares estabilizados con emulsión asfáltica*. Unidad de Materiales y Pavimentos, PITRA, LanammeUCR. Universidad de Costa Rica.
- Ulloa, A.; Múnera, J. & Ramírez, W. (2018). *Diseño de materiales granulares estabilizados con asfalto espumado*. Unidad de Materiales y Pavimentos, PITRA, LanammeUCR. Universidad de Costa Rica.
- WIRTGEN. (2004). *Manual de reciclado en frío*, (2 ed). Wirtgen GmbH. Windhagen, Alemania.
- WIRTGEN. (2012). *Wirtgen cold recycling technology*. Wirtgen GmbH. Windhagen, Alemania.
- WIRTGEN. (2017). *BSM Cold recycling*. Laboratory handbook. Wirtgen GmbH. Windhagen, Alemania.

8. Anexos

A1. Procedimiento para calibrar el espumado del asfalto en laboratorio

Este proceso puede variar según el fabricante del equipo, por lo que se deberá utilizar el procedimiento que este indique.

Para la descripción del procedimiento que a continuación se presenta se utilizó el equipo Wirtgen WLB 10S (Figura A1.1):



Figura A1.1. Planta de laboratorio de asfalto espumado (Wirtgen GmbH, 2017).

Para este equipo realice el siguiente procedimiento:

Paso 1: Precalear el asfalto a 110 °C para que se encuentre fluido antes de calibrarlo en la cámara de espumado.

Paso 2: Calentar el asfalto dentro del tanque calentador de la unidad de laboratorio (, con la bomba circulando el asfalto por el sistema, hasta alcanzar la temperatura requerida (normalmente comenzando con 160 °C). Mantenga la temperatura requerida durante al menos 5 minutos antes de comenzar las pruebas.

Paso 3: Siga el procedimiento descrito en el manual del equipo de espumado. Calibre la tasa de descarga de asfalto y ajuste el temporizador en la unidad de laboratorio para descargar 500 g de asfalto.

Paso 4: Ajustar el medidor de caudal de agua para alcanzar la tasa de inyección requerida de agua.

Paso 5: Precalear el recipiente de acero, para la calibración del asfalto, a 75 °C.

Paso 6: Descargar asfalto espumado. Utilizando la varilla de medición suministrada con la unidad de laboratorio (la cual está calibrada para un recipiente de acero de 275 mm de diámetro y 500 g de asfalto) medir la altura máxima alcanzada por el asfalto espumado en el recipiente. Esto es registrado como el volumen máximo.

Paso 7: Use el cronómetro para medir el tiempo, en segundos, que transcurre para que la espuma colapse a la mitad de su volumen máximo. Este tiempo es registrado como la vida media del asfalto espumado.

Paso 8: Repetir el procedimiento anterior tres veces o hasta alcanzar lecturas similares.

Paso 9: Repetir los pasos del 3 al 7 para un rango de al menos tres tasas de inyección de agua. Típicamente se usan valores de 2 %, 3 % y 4 % por la masa de asfalto.

Paso 10: Trazar un gráfico de la razón de expansión versus vida media, para las diferentes razones de inyección de agua sobre los mismos ejes (mirar el ejemplo en la Figura 4). La adición óptima de agua es escogida como un promedio de los dos contenidos de agua requeridos para lograr los criterios mínimos.

Paso 11: Repetir el Paso 1 a 10 para otras dos temperaturas de asfalto (normalmente 170 y 180 °C en función de las posibilidades del equipamiento que se utilizará para la construcción).

A2. Compactación vibratoria en laboratorio

El método que mejor representa las propiedades del material compactado en campo es mediante el martillo vibratorio, por lo que en la Tabla A2.1, se definen en detalle las características para este tipo de compactación en cada fase del diseño.

Tabla A2.1. Características para compactación vibratoria de especímenes

Fase	Contenido óptimo de asfalto	Ensayos triaxiales	
Ensayo	Tensión indirecta	Triaxial y MR	
Diámetro de espécimen (mm)	152	152	102 ⁽¹⁾
Altura de espécimen (mm)	95	300	203
Sobrecarga sobre el martillo (kg)	10	10	5
Número de capas	2	5-6	5-6
Tiempo de compactación por capa (s)	60-120	60-120	30-60

⁽¹⁾ Puede utilizarse especímenes de 102 mm de diámetro y 203 mm de altura cuando haya una limitación en la capacidad del equipo triaxial.

A2.1 Equipo

Para fabricar especímenes mediante compactación vibratoria se requieren los siguientes equipos:

- Martillo vibratorio con las siguientes especificaciones:
 - Potencia: 1500 W
 - Frecuencia: de 900 a 1890 pulsos por minuto (15-31,5 Hz)
 - Energía aplicada en el punto: 25 J

El martillo vibratorio debe estar montado en dos barras guía, una en cada lado del martillo. Se debe ajustar una estructura de montaje al martillo vibratorio que permita que se aplique una masa de 10 kg. La masa del martillo vibratorio, la sobrecarga y la cabeza de montaje en conjunto debe pesar 30,0 kg \pm 1,5 kg. Debe existir un sistema de poleas que conecte el marco con la estructura de montaje. Esto permite, de manera sencilla, la elevación y el descenso de martillo vibratorio. En Figura A1.1 se muestra el equipo de compactación y los accesorios.

	<ul style="list-style-type: none"> • Una sobrecarga montada sobre el martillo vibratorio, según Tabla A1.1
	<ul style="list-style-type: none"> • Los moldes deben ser de acero desarmables con las dimensiones que se indican en la Tabla A1.1, con collarín y plato base.
	<ul style="list-style-type: none"> • Pie de compactación de 100 mm y 150 mm de diámetro.
	<ul style="list-style-type: none"> • Pie de rey, con una longitud mínima de 300 mm o 500 mm.
	<ul style="list-style-type: none"> • Balanza con capacidad mínima de 20 kg y una división de escala de 0,1 g.
	<ul style="list-style-type: none"> • Recipiente hermético con una capacidad de 15 L a 20 L aproximadamente.
	<ul style="list-style-type: none"> • Una bandeja o recipiente de mezclado.
	<ul style="list-style-type: none"> • Una espátula ancha de mezclado.
	<ul style="list-style-type: none"> • Una espátula delgada de 200 mm de largo.
	<ul style="list-style-type: none"> • Contenedores para muestras de 1 kg para contenido de humedad
	<ul style="list-style-type: none"> • Horno de secado aire forzado, termostáticamente controlado y capaz de mantener una temperatura entre 105 a 110 °C.
	<ul style="list-style-type: none"> • Filtro de plástico de 100 mm o 150 mm de diámetro.
	<ul style="list-style-type: none"> • Líquido o spray lubricante.
	<ul style="list-style-type: none"> • Cuchara de pulpero 90 mm de diámetro por 85 mm de largo.

Figura A2.1. Equipo y accesorios para compactación.

A2.2 Procedimiento de compactación

Paso 1. Se fija la cabeza de montaje y el pie de compactación al martillo vibratorio y se ajusta a las barras guía. Colocar la sobrecarga sobre la cabeza de montaje y ajustar firmemente según la Figura A1.1. Utilizando un sistema de poleas elevar el martillo vibratorio hasta la máxima altura posible o hasta la altura adecuada que permita al operador trabajar debajo del martillo vibratorio de forma segura.

Paso 2. Limpiar el molde, el collarín y el plato base. Lubricar el interior del molde con una aplicación muy leve de grasa o de aerosol antiadherente. Esto permite la fácil remoción del espécimen compactado en el molde y su limpieza.

Paso 3. Fijar el molde a la base del marco de compactación directamente debajo del pie del martillo vibrador. Colocar 1 filtro de plástico en el fondo del molde. Bajar el martillo vibratorio dentro de molde, asegúrese de que el pie de compactación quede paralelo a la base del molde. Permitir que el martillo vibratorio descanse sobre el interior del molde sin ningún material presente. Marcar una línea con un marcador permanente debajo del soporte, esta será la línea cero (Figura A2.2), en caso de medir la altura de capa compactada.

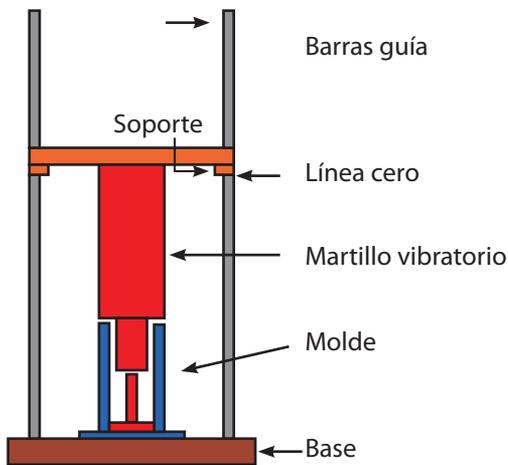


Figura A2.2. Preparación del molde (Adaptado de Kelfkens, 2008).

Paso 4. La cantidad necesaria de material por capa se basa en la densidad máxima húmeda y el volumen del espécimen compactado (Ecuación A2.1). La cantidad de material por capa será la cantidad total de material dividida entre el número de capas.

$$M_{\text{especimen/capa}} = \frac{D_{\text{máx húmeda}} \cdot V_{\text{especimen}}}{n} \quad \text{Ecuación A2.1}$$

Donde:

$M_{\text{especimen/capa}}$ = masa de material por capa, kg

$D_{\text{maxhúmeda}}$ = Densidad máxima húmeda, kg/m³

$V_{\text{especimen}}$ = Volumen del espécimen compactado, m³

n = número de capas

Paso 5. Colocar el material dentro del molde utilizando una cuchara. Utilizar una espátula para acomodar y distribuir el material en el molde evitando cualquier segregación de la muestra. Asegurarse de que el material esté nivelado lo mejor posible hasta que el pie de compactación descansa sobre el material. Se debe verificar que el pie de compactación se mantenga limpio sin ningún material adherido a su cara de compactación.

Paso 6. Compactar a la frecuencia máxima de martillo en el tiempo indicado en Tabla A2.1 o hasta cumplir con la altura requerida por capa. Si no se puede lograr alcanzar la densidad requerida en ninguna capa después de compactar durante 120 segundos con el martillo vibratorio, se debe finalizar el procedimiento de fabricación y aumentar el número de capas.

Paso 7. Después de la compactación de la capa, eleve el martillo vibratorio y asegure. Mida la altura de la capa compactada si se utiliza el control por altura.

Paso 8. Si para la primera capa no se cumplió con la altura requerida, para las capas de 2 a 6, si es necesario, ajuste la cantidad de material de tal manera que se obtenga la altura requerida. Utilizar un cuchillo o espátula para escarificar la superficie de la capa compactada hasta una profundidad de ± 10 mm. Agregar la cantidad necesaria de material, asegurarse de que el material esté nivelado lo mejor posible. Para la capa final, colocar un filtro circular de plástico encima del material, bajar el martillo vibratorio nuevamente y compactar.

Paso 9. Desmolde y mida la altura final del espécimen. Pese y anote la masa respectiva.

Nota: Para el control de altura por capa, después de la compactación, elevar el martillo vibratorio y asegurarlo, medir la distancia desde la posición inicial (previamente marcada en el paso 3) hasta la posición superior final (Figura A2.2). Esta distancia representa la altura final del espécimen compactado.

A3. Ensayo triaxial

Este ensayo describe la determinación de los parámetros de corte triaxial (cohesión y ángulo de fricción interna) en materiales estabilizados con asfalto, para medir la resistencia a la falla (monotónica) en especímenes cilíndricos, usualmente, de 150 mm de diámetro y 300 ± 2 mm de altura (SABS, 2018).

A3.1 Equipo

Cámara de presión triaxial

La cámara de presión se usa para contener el espécimen de ensayo y el fluido de confinamiento durante la prueba. En la Figura 2 se muestra una cámara triaxial. La deformación se mide externamente con dos transductores diferenciales lineales (LVDT), como se muestra en la Figura A3.1.



Figura A3.1 Equipo triaxial para resistencia al corte.

Máquina de ensayo

El Sistema de Ensayo de Materiales (MTS) o un sistema equivalente debe comprender al menos un actuador, un marco de reacción, un panel de control y un sistema de adquisición de datos. El sistema debe ser capaz de proporcionar cargas de rampa con una capacidad de carga mínima de 100 kN y un recorrido mínimo de 40 mm. Es preferible que el actuador sea operado por un sistema de presión hidráulica servo-controlado con un sistema de retroalimentación de circuito cerrado que sea capaz de realizar el ensayo controlado por desplazamiento, carga o ambos, cuando sea requerido.

Equipos de medición

Los dispositivos de medición deben incluir, entre otros:

- Celda de carga (100 kN de capacidad) para medir la carga.
- Transductor de desplazamiento del actuador (> 40 mm de recorrido) para medir el desplazamiento (deformación), o dos transductores diferenciales lineales (LVDT) para medir la deformación externamente.
- Regulador de presión, manómetros y válvulas para presión lateral.

Otros equipos o accesorios

- Compresor de aire
- Pistón de carga
- Aceite de silicón o grasa

A3.2. Preparación de espécimen

La muestra debe prepararse de acuerdo con el procedimiento de compactación de martillo vibratorio (Anexo A2) y curarse de acuerdo con el protocolo de curado para humedad de equilibrio, según sección Adhencia y recubrimiento de la emulsión asfáltica.

A3.3. Procedimiento

Montaje de espécimen en cámara triaxial

El ensayo triaxial de las muestras debe realizarse dentro de las 48 a 72 horas posteriores a la finalización del procedimiento de curado. Los siguientes pasos describen el procedimiento tomado para ensamblar la muestra en la cámara triaxial y colocarla en el marco de carga:

Paso 1. Posterior al curado, asegurarse que los especímenes, el equipo y accesorios se encuentren a una temperatura de 25 °C, para ello, se requiere de un cuarto con temperatura controlada. Seleccione cuatro muestras de densidad comparable, contenido de humedad y acondicionadas a 25 °C.

Paso 2. Pese y mida el diámetro al menos 2 veces en la parte de arriba, en el medio y a bajo de espécimen, y además realice 4 mediciones de su altura.

Paso 3. Coloque la membrana de látex en el espécimen, luego los discos con las piedras porosas previamente humedecidas.

Paso 4. Lleve el espécimen a la base, luego coloque con cuidado la cámara triaxial y asegúrese de que haya suficiente espacio entre el actuador y el marco de reacción para acomodar la celda triaxial. Tenga cuidado de no dañar los bordes de la muestra durante este procedimiento.

Paso 5. Coloque y centre la cámara triaxial en el marco de carga hidráulico; ajuste la posición del actuador hasta dejar una leve luz. Conecte el suministro de aire a la entrada de la presión de la cámara y abra la válvula, ajuste la presión de confinamiento hasta que esta sea estable en el nivel deseado. Revisar si existen fugas de aire. Conectar los transductores diferenciales lineales (LVDT).

Paso 6. Configure el sistema en modo de control de desplazamiento. Establezca la tasa constante de desplazamiento en 2,1 % con respecto a la deformación axial, o según la recomendación del fabricante del equipo, en donde se recorra la escala completa para la carga y el desplazamiento.

Paso 7. Previo a la realización de ensayo, de ser necesario, aplique un esfuerzo desviador de 5 kPa y una presión de confinamiento de 25 kPa. Ajuste posteriormente la presión de confinamiento de ensayo según las pruebas monotónicas: 0 kPa, 50 kPa, 100 kPa y 200 kPa.

Paso 8. Corra el ensayo para el primer espécimen sin presión de confinamiento (0 kPa). Registre la carga vs el desplazamiento durante la prueba a una tasa mínima de almacenamiento de datos recomendada de 10 Hz, así como, la presión de la celda, la temperatura y la identificación de la muestra.

Paso 9. Detenga la prueba y el registro de datos cuando el desplazamiento total exceda los 18 mm (6 % de la deformación axial) o cuando el espécimen se deforme excesivamente antes de que se alcance el desplazamiento final.

Paso 10. Repita los pasos del 7 al 8 hasta que hayan sido completados los cuatro niveles de presión de confinamiento.

Paso 11. Reduzca la presión de confinamiento hasta cero, para liberar la presión de la celda y de la cámara triaxial, posteriormente desconecte las entradas de aire ya sin aire para desmontar el equipo y remover el espécimen con cuidado de la base.

Paso 12. Introduzca cada uno de los especímenes en una bolsa plástica al finalizar cada ensayo. Posteriormente remueva la bolsa y obtenga el contenido de humedad correspondiente.

A3.4. Cálculo del ángulo de fricción interno y cohesión

Paso 1. Determinar la densidad bruta seca, de acuerdo a la ecuación 15, de la sección 5.8. (Wirtgen GmbH, 2017)

Paso 2. Cuando el equipo únicamente reporte la carga de falla, calcule el esfuerzo correspondiente con la ecuación A3.4.1

$$\sigma_{a,f} = \frac{4xP_{a,f}}{\pi xd^2} \times 10^6 \quad \text{Ecuación A3.4.1}$$

Donde,

$\sigma_{a,f}$ = esfuerzo de falla aplicado, kPa

$P_{a,f}$ = carga aplicada, KN

d = diámetro del espécimen al inicio de la prueba, mm

Paso 3. Determinar el esfuerzo de falla total, según la ecuación A3.4.2

$$\sigma_{1,f} = \sigma_{a,f} + \sigma_{D,W} \quad \text{Ecuación A3.4.2}$$

Donde,

$\sigma_{1,f}$ = esfuerzo de falla aplicado, kPa

$\sigma_{D,W}$ = esfuerzo debido al peso de la cabeza y plato de la celda de aplicación de carga, según ecuación A3.3, kPa

$$\sigma_{D,W} = \frac{4x(M_{TP} + M_{LR})}{\pi xd^2} \times g \times 10^6 \quad \text{Ecuación A3.4.3}$$

Donde,

M_{TP} = masa del plato superior, kg

M_{LR} = masa del pistón de carga, kg

g = aceleración estándar debida a la gravedad (9,81), m/s²

d = diámetro del espécimen al inicio de la prueba, mm

Paso 4. La relación entre $\sigma_{1,f}$ y el esfuerzo de confinamiento (σ_3) es lineal, representado por la ecuación A3.4.4:

$$\sigma_{1,f} = A \times \sigma_3 + B \quad \text{Ecuación A3.4.4}$$

Donde,

σ_3 = esfuerzo confinamiento, kPa

Realice un análisis de regresión lineal para las variables $\sigma_{1,f}$ y σ_3 , para determinar los valores de A (pendiente) y B (intercepción). Es decir, grafique los resultados de las pruebas $\sigma_{1,f}$ y σ_3 para todas las muestras sin acondicionamiento ($\sigma_{1,f}$ en el eje Y y σ_3 en el eje X). Seleccione la línea recta que mejor se ajuste a los puntos, en la Figura A3.2 se muestra un ejemplo de la regresión para un material estabilizado con asfalto espumado.

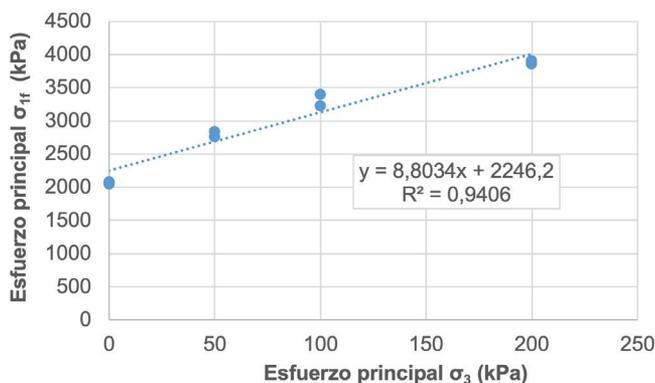


Figura A3.2. Resultados del ensayo de resistencia al corte.

Paso 5. Calcular las propiedades de corte (Cohesión "C" y ángulo de fricción interna " ϕ ").

La relación entre los valores de A (pendiente), B (intercepción) y las propiedades de corte es:

$$A = \frac{1 + \text{sen } \phi}{1 - \text{sen } \phi} \quad B = \frac{2 \times C \times \cos \phi}{1 - \text{sen } \phi} \quad (\text{Teoría de Mohr-Coulomb}) \quad \text{Ecuación A3.4.5}$$

Donde,

C = Cohesión, kPa

ϕ = Ángulo de fricción interno, °

Use los valores de A y B para el análisis de la regresión lineal:

$$\text{Ángulo de Fricción Interna, } \phi = \text{sen}^{-1} \left[\frac{A-1}{A+1} \right], \text{ } ^\circ \quad \text{Ecuación A3.4.6}$$

$$\text{Cohesión, } C, \phi = \text{sen}^{-1} \frac{B \times (1 - \text{sen} \phi)}{2 \times \text{cos} \phi}, \text{ kPa} \quad \text{Ecuación A3.4.7}$$

En la Figura A3.3 se observa un ejemplo de lo anterior, para un material estabilizado con asfalto espumado.

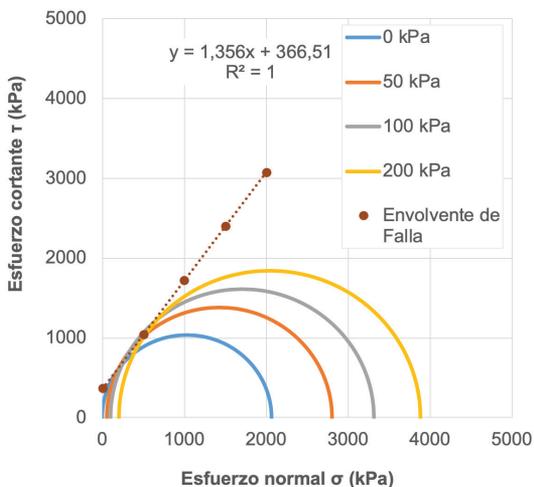


Figura A3. 3. Envolvente de Falla.

Paso 5. Calcular la cohesión retenida mediante la ecuación A3.4.8.

$$\text{Cohesión retenida} = \frac{(\sigma_{1,100,S} - 100)}{(\sigma_{1,100,U/S} - 100)} \times 100 \quad \text{Ecuación A3.4.8}$$

Donde,

Cohesión retenida = relación entre $\sigma_{1,100,S}$ y $\sigma_{1,100,U/S}$ kPa

$\sigma_{1,100,S}$ = promedio de esfuerzo de falla, en especímenes saturados a 100 kPa de presión de confinamiento, kPa

$\sigma_{1,100,U/S}$ = promedio de esfuerzo de falla, en especímenes sin acondicionar a 100 kPa de presión de confinamiento, kPa

A4. Consideraciones para el diseño de pavimentos

Para el diseño de pavimentos según la Metodología AASHTO 93, se indican los coeficientes estructurales recomendados para materiales estabilizados con asfalto.

Coeficiente estructural de capa (por pulgada)	0,18	0,23		0,28	max 0,35
Resistencia a la tensión (ITS) indirecta después de la estabilización					
Especímenes 100/150 mm Ø					
ITS sin acond (kPa)	125	175		225	
ITS acond (kPa)	50	75		100	
Especímenes 150 mm Ø					
ITS equil (kPa)	95	135		175	
Resistencia al corte					
Cohesión (kPa)	50	100		250	
Ángulo de fricción (°)	25	30		40	
CBR del material antes de estabilizar					
No se recomiendan materiales con CBR < 20%	20	40		80	
Tasa de asfalto prevista para estabilización (% masa)					
		2,5-4,0	2,0-3,0	1,8-2,3	

Figura A4. 1. Coeficientes estructurales (Wirtgen GmbH, 2012).

Para método de diseño de pavimentos mecanicistas, se indican los módulos de resiliencia esperados para este tipo de materiales, los cuales pueden ser calculados mediante el ensayo de MR (AASHTO, 2012):

Tabla A4 1. Módulos resilientes típicos (Wirtgen GmbH, 2012)

Tipo de material	Contenido de asfalto (%)	Módulo resiliente MR (MPa)
100% RAP	1,6 a 2,0	1000 a 2000
RAP/Roca triturada (combinación 50:50)	1,8 a 2,5	800 a 1500
Roca triturada bien graduada	2,0 a 3,0	600 a 1200
Gravas naturales (IP < 10, CBR > 45)	2,2 a 3,5	400 a 800
Gravas naturales (IP < 10, CBR > 25)	2,5 a 4,0	300 a 600

A5. Construcción

A5.1. Reciclado en frío en sitio

Las máquinas de reciclado en sitio han evolucionado a través de los años, desde las primeras máquinas modificadas para fresar y estabilizar suelos, hasta las recicladoras especializadas utilizadas hoy en día. Las recicladoras modernas tienden a ser máquinas grandes y potentes, las cuales pueden estar montadas sobre orugas o sobre neumáticos de flotación (Wirtgen GmbH, 2004).

El elemento más importante de una máquina recicladora es el rotor fresador-mezclador (Figura A5.1) equipado con un gran número de puntas, especialmente diseñadas para este proceso. El tambor normalmente rota y pulveriza el material del pavimento existente.

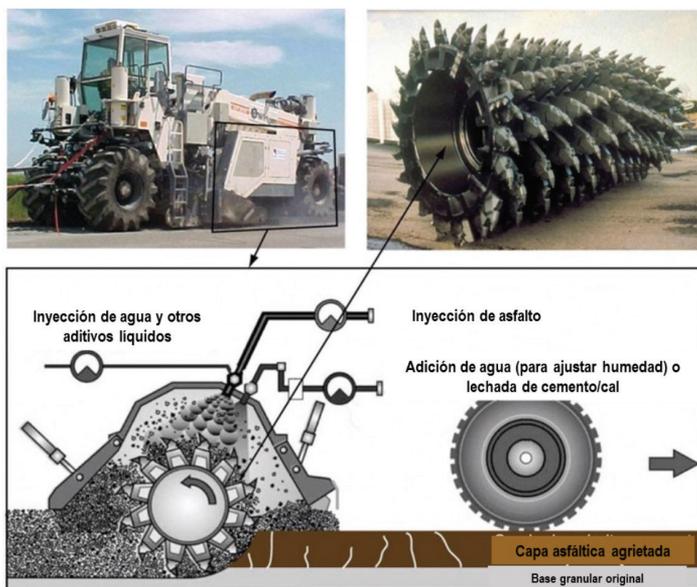


Figura A5.1. Tambor fresador-mezclador (Wirtgen GmbH, 2004).

A medida que la máquina avanza con el tambor rotando, el agua de un tanque acoplado a la recicladora se llena mediante mangueras dentro de la cámara de mezclado de la recicladora. El flujo de agua es medido con precisión mediante un microprocesador controlado por un sistema de bombeo, mientras que el tambor mezcla el agua con el material

reciclado para alcanzar el contenido necesario de humedad. De esta forma es posible conseguir altos niveles de compactación. Agentes estabilizadores líquidos, como lechada cemento / agua o emulsión asfáltica, tanto en forma separada como combinadas, pueden ser introducidas directamente a la cámara de mezclado de una forma similar. Además, el asfalto espumado puede ser inyectado dentro de la cámara de mezclado mediante una barra de aspersión especialmente diseñada.

Otros agentes estabilizadores, como la cal hidratada, son normalmente repartidos en la superficie del pavimento existente, delante de la recicladora. La recicladora pasa trabajando sobre el estabilizador en polvo, mezclando a éste con el material recuperado, para luego inyectarle agua, todo en una sola pasada.

Los trenes de reciclado pueden ser configurados de distinta manera (Figura A5.2), dependiendo de la aplicación de reciclado y del tipo de agente estabilizador que sea utilizado. En cada caso la máquina recicladora ejerce la tracción en el tren de reciclado, empujando o tirando el equipo que está conectado a la misma mediante barras de empuje o lanzas.



Figura A5.2. Configuración de tren de reciclado en frío (Wirtgen GmbH, 2012).

A5.2. Requerimientos y limitaciones generales

Bajo ninguna circunstancia, se deben realizar trabajos en condiciones de niebla o lluvia, ni comenzar ningún trabajo si existe el riesgo de que no se complete antes de que se den estas condiciones.

Evitar la dispersión de agentes estabilizadores químicos en polvo (cal o cemento) en la carretera delante de la recicladora cuando las condiciones de viento afecten adversamente la operación.

El máximo período de tiempo entre el mezclado del material reciclado con un agente estabilizador y la compactación del material colocado

debe ser determinado por el tipo de agente estabilizador que se utilice. Cuando se utilicen más de dos agentes estabilizadores en forma combinada, la limitación de tiempo está dada por el agente individual más restrictivo.

Tabla A5.1 Periodo máximo entre el mezclado y la compactación

Agente estabilizador	Periodo máximo
Cemento	3 horas
Cal hidratada	8 horas si se mantiene húmedo
Emulsión asfáltica	24 horas o antes de que la emulsión rompa
Asfalto espumado	24 horas

Dentro de los 2 minutos previos al reciclado con cada nueva carga de tanque de asfalto se deben determinar las características de espumado del asfalto, a través de la medición de una muestra obtenida de la boquilla de dispersión de la recicladora.

El contenido de humedad durante la compactación no debe exceder el contenido de humedad óptimo ($\pm 2\%$), ni debe ser menos que el 80 % del contenido óptimo de humedad para una adecuada compactación del material.

La velocidad de avance de la máquina recicladora, la velocidad de rotación del tambor fresador y el posicionamiento de las compuertas de la cámara del tambor mezclador deben ser ajustadas de manera que el material in-situ sea pulverizado a una graduación aceptable. Se recomienda retirar partículas de sobretamaño del material granular a estabilizar, que no sean triturados o fragmentados por la recicladora.

La velocidad de avance debe ser verificada y registrada al menos cada 200 m de corte. Los límites de tolerancia no deben ser menor a 6 m/min y no mayor a 12 m/min.

Para asegurar el reciclado en el ancho completo del camino, las juntas longitudinales entre cortes sucesivos deben traslaparse un mínimo de 150 mm. También, se recomienda traslapar juntas transversales de construcción 600mm.

Normalmente se utilizan tres rodillos (Figura A5.3 y Figura A5.4) para compactar el material detrás de la recicladora. Primero se posiciona un

rodillo primario pesado (liso o “pata de cabra”), aplicando una compactación de alta amplitud, con el fin de densificar la parte inferior de la capa reciclada. Una vez alcanzada una compactación uniforme en los dos tercios inferiores de la capa reciclada, se utiliza una moto-niveladora para perfilar y obtener las cotas finales requeridas. A continuación, se debe compactar utilizando un rodillo liso a baja amplitud y alta frecuencia para compactar la porción superior de la capa. Cuando se utiliza una máquina sobre orugas, el material se deposita normalmente a través de una placa compactadora, que permite una pre-compactación con acabado (Figura A5.5), dejando que el equipo compactador (rodillo vibratorio simple o doble) complete el proceso de compactación. Al término del proceso de compactación, se utiliza un rodillo neumático para lograr un acabado superficial liso.



Figura A5.3. Compactación primaria (The Gorman Group, LLC, s.f.).

El rodillo primario es crítico, debido a que es el responsable de lograr la densidad requerida en la porción inferior de la nueva capa reciclada. La Figura A5.6. representa una guía básica para seleccionar la masa estática y el tipo de rodillo que normalmente se utiliza en proyectos de reciclado. El espesor de la capa reciclada y la granulometría del material reciclado son los criterios principales de selección.



Figura A5.4. Compactación final (Wirtgen GmbH, 2012).

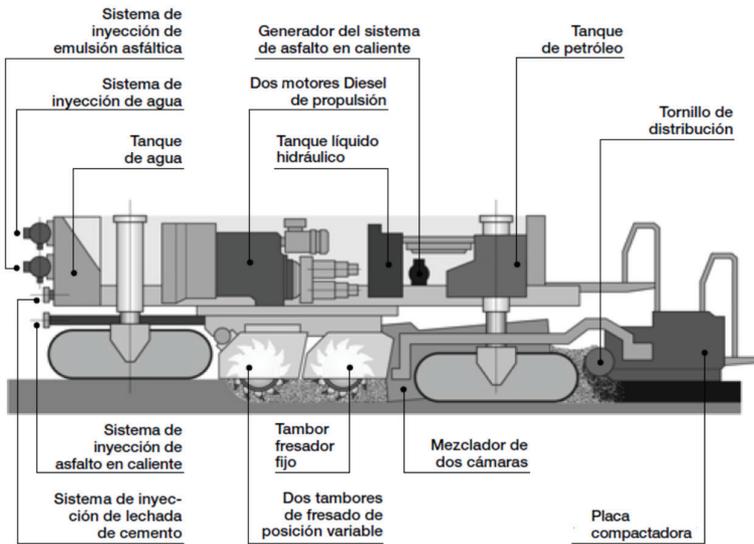


Figura A5.5. Proceso de reciclado utilizando máquina sobre orugas (Wirtgen GmbH, 2004).

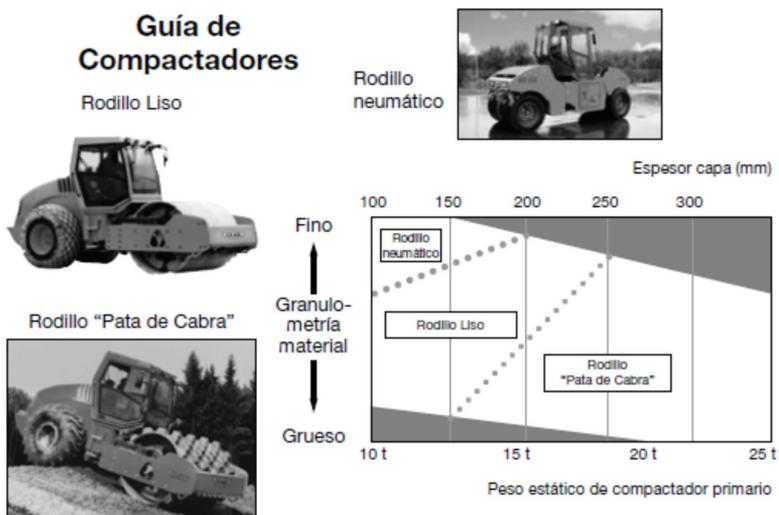


Figura A5.6. Selección de compactador primario (Wirtgen GmbH, 2004).

La compactación se hace por secciones no mayores a 100 m hasta que cada sección cumpla con densidad máxima requerida. La compactación en sitio debe ser de al menos el 98 % de la densidad máxima identificada en laboratorio.

Antes de abrir al tránsito y después de completar la compactación, se debe tratar la superficie con una leve aplicación de agua, o de emulsión asfáltica de rompimiento lento diluida cuando se especifique, y compactar con un compactador de neumáticos para alcanzar una superficie compacta y cerrada. Mantener la superficie húmeda hasta la colocación de la siguiente capa.

Se debe colocar la superficie de ruedo, ya sea carpeta asfáltica o sello asfáltico, sobre la base estabilizada dentro de los 14 días posteriores a la compactación o hasta que el contenido de humedad del material en los 100 mm superiores de la capa estabilizada este por debajo del 50 % de óptimo de humedad (Wirtgen GmbH, 2012).

Una muestra ± 200 kg es tomada normalmente atrás de la recicladora, al menos una vez por cada 2500 m² de pavimento reciclado. Este material es colocado en un contenedor sellado y llevado inmediatamente al laboratorio para ser ensayado. Los ensayos normales incluyen:

- Contenido de humedad.
- Relación humedad/densidad para determinar la densidad máxima seca (también usada para determinar el porcentaje de compactación alcanzado en campo).
- Determinación de la resistencia de especímenes fabricados para ensayo de resistencia a la tensión indirecta. (Se ajusta la humedad al contenido óptimo de humedad antes de compactar los especímenes).
- Otros ensayos incluyen granulometría e índice de plasticidad.



LanammeUCR

LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

 11501-2060 San José, Costa Rica

 (506) 2511-2500

 direccion.lanamme@ucr.ac.cr

 www.lanamme.ucr.ac.cr