



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

“ASFALTO ESPUMADO”

T E S I N A

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

ESPECIALISTA EN VÍAS TERRESTRES

P R E S E N T A:

ING. ÁNGEL WILLIAM VALDEZ ALCORN

DIRECTOR DE TESINA: ING. ERNESTO RENE MENDOZA SÁNCHEZ

CIUDAD DE MÉXICO

NOVIEMBRE 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

Ha llegado otra etapa de mi vida que he de concluir, una meta propuesta, y que al fin se ha logrado.

Quiero agradecer al dador de vida, mi Dios y también a mi Madre Santísima del cielo, por ser ellos mis ayudantes siempre, quienes me recuerdan que vale la pena luchar, en busca de ser buen ser humano, capaz de ayudar y servir siempre a quien más lo requiera y necesite.

Se que no ha sido fácil llegar hasta esta etapa de mi vida, porque al volver la mirada atrás, recordar todo lo que he pasado provoca en mi un sentimiento de felicidad y alegría.

Sin duda alguna a quien en la tierra le agradezco infinitamente será a mi Madre Alicia Alcorn, que siempre ha dado todo por nosotros sus hijos, quienes compartimos el mismo sentir de agradecimiento por ser noble, amorosa, valiente, triunfadora, decidida, con coraje para ser la mujer que ha logrado ser, esas infinitas fuerzas para siempre luchar, dar sin recibir nada, siempre tener una palabra de consuelo, saber que tenemos en la tierra a alguien que al final de un momento difícil, puedes acudir a ella como una amiga fiel dispuesta escuchar.

Siempre te lo agradeceré Mamá y pediré a Dios por ti, para que nunca te falte lo necesario. Te Amo Mamá, este logro es tuyo porque tú eres mi motivación, apoyo principalmente, al igual que mi familia y todos mis seres queridos.

Quiero agradecer a mis maestros, de la Universidad Nacional Autónoma de México, por ayudarme en mi formación como profesionista y por estar dispuestos a compartir sus conocimientos.

Gracias por todo, con cariño Ángel William Valdez Alcorn.

Índice

Índice	
Capítulo 1 Generalidades	9
Introducción.....	10
1.1 Planteamiento del problema.....	14
1.2. Objetivos	14
1.2.1 Objetivo General	14
1.2.2 Objetivos Particulares.....	14
1.3 Hipótesis de Investigación.....	15
1.4 Metodología de Investigación	15
Capítulo 2 Mezclas asfálticas	16
Introducción.....	17
2.1 Mezclas asfálticas en caliente	17
2.2 Mezclas asfálticas en frío	19
2.3 Mezclas asfálticas por el sistema de riegos	20
2.4 Características de las Mezclas Asfálticas.....	20
Capítulo 3 Asfalto espumado	22
Introducción.....	23
3.1 El origen del asfalto espumado	25
3.2 Definiciones.....	26
3.3 La Tecnología de asfalto espumado	28
3.4 El propósito de espumar.....	30
3.5 Calidad del Asfalto Espumado	30
3.6 Maquinaria.....	31
3.6.1 Desarrollo de la Maquinaria para la elaboración del asfalto espumado	32
3.6.2 Descripción de la Maquinaria	33
3.7 Equipo de laboratorio para el análisis de las propiedades con WLB 10.....	37
Capítulo 4 Procedimiento para el diseño de una base estabilizada con asfalto espumado, construcción y control de calidad	39
Introducción.....	40
4.1 Diseño de una base estabilizada con asfalto espumado.....	41
4.1.1 Etapa 1. Caracterización de los materiales	43
4.1.2 Etapa 2: Determinación de la granulometría de diseño y compactación	44
4.1.3 Etapa 3: Determinación de las propiedades espumantes del asfalto	47
4.1.4 Etapa 4: Diseño de la mezcla de materiales	51
4.2 Construcción de la base estabilizada con asfalto espumado	56
4.2.1 Fresado de carpeta existente	56
4.2.2 Almacenamiento del material	57

4.2.3 Detección de baches.....	57
4.2.4 Estabilización de la base con asfalto espumado	58
Capítulo 5 Ventajas del uso del asfalto espumado y experiencias en algunos países del mundo	62
Introducción.....	63
5.1 Ventajas del asfalto espumado	64
5.2 Experiencias en algunos países del mundo	65
5.2.1 Arabia Saudita una carretera en el desierto para el tráfico de gran tonelaje	65
5.2.2 Saneamiento de las vías a lo largo de la red de canales en el distrito Los Baños en Estados Unidos de América.	67
5.2.3 Máximo rendimiento gracias al empleo de asfalto espumado en un proyecto de saneamiento en Noruega	68
Conclusiones.....	70
Bibliografía.....	73

Resumen

El uso del asfalto espumado en México es relativamente nuevo; las referencias para su diseño y construcción no son de fácil acceso para cualquier ingeniero, además, las normas vigentes no contemplan esta nueva forma de mezcla asfáltica, por tanto, el presente trabajo tiene como objetivo dar a conocer la Tecnología del Asfalto Espumado desde sus orígenes hasta el momento actual y su correcto empleo, en tiempos donde las necesidades y el estado actual de la red carretera de nuestro país, requiere de fuertes y cuantiosas inversiones económicas, pero también de cuidados al medio ambiente y sus recursos naturales.

Parte de este trabajo muestra la aplicación de la metodología del manual Wirtgen Cold Recycling Thecnology del Grupo Wirtgen,¹ el cual utiliza tres diferentes niveles de tránsito, para establecer la fórmula de trabajo de una base estabilizada con asfalto espumado; así como las pruebas y ensayos para su óptima elaboración.

México necesita innovar, estar a la vanguardia ante las demandas y exigencias de la sociedad actual, conociendo los tipos de mezclas asfálticas existentes, nuevas tecnologías de asfalto, diseño, normativas, equipo y maquinaria; desde luego con el compromiso del desarrollo de sus propias metodologías, investigaciones, estudios e inventos, que respondan a los requerimientos y necesidades de nuestra nación, para estar preparados ante embates que se nos presenten, con la capacidad suficiente de respuesta ante ello.

Espero que la presente tesina, contribuya un punto de partida para extender el uso del asfalto espumado en nuestra nación.

¹ Wirtgen Cold Recycling Thecnology, 2012.

Lista de Figuras

<i>Ilustración 1 Clasificación de la red nacional. Fuente SCT.</i>	10
<i>Ilustración 2 Ejes troncales de México donde diariamente se mueve 3 millones de pasajeros y 470 millones de toneladas de carga. Fuente SCT.</i>	11
<i>Ilustración 3 Clasificación de las mezclas asfálticas según la Norma N-CMT-4-05-003/08.</i>	13
<i>Ilustración 4 Metodología a seguir para el desarrollo del presente trabajo.</i>	15
<i>Ilustración 5 Colocación de mezcla asfáltica en frío.</i>	19
<i>Ilustración 6 Tipos de mezclas de reciclaje de pavimento asfáltico, conocido como Rap.</i>	24
<i>Ilustración 7 Muestra como cantidades de agua y aire, logran en el asfalto caliente, una expansión, denominada espuma. Fuente Wirtgen.</i>	26
<i>Ilustración 8 Carátula del Manual Wirtgen Cold Recycling Technology.</i>	27
<i>Ilustración 9 Organización inventora de la primera cámara de expansión para la elaboración del asfalto espumado.</i>	28
<i>Ilustración 10 Teniendo en cuenta la presión y la temperatura, en las cámaras de expansión se produce asfalto espumado de excelente calidad.</i>	29
<i>Ilustración 11 La calidad del asfalto espumado es de suma importancia tener presente, que los factores vida media y expansión se desarrollan en sentido contrario, mientras más aumente la cantidad de agua agregada. Fuente publicación IMT 519.</i>	31
<i>Ilustración 12 Breve línea del tiempo de las etapas del desarrollo de las plantas productoras de asfalto espumado.</i>	32
<i>Ilustración 13 Obtención del asfalto espumado. Fuente Wirtgen.</i>	34
<i>Ilustración 14 Especificaciones Técnicas de KMA 220.</i>	35
<i>Ilustración 15 Planta de mezclado en sitio y su esquema de producción de asfalto espumado. Fuente Wirtgen maquinaria.</i>	36
<i>Ilustración 16 Dimensiones en metros de la KMA 220 en posición de ser transportada. Fuente Wirtgen maquinaria.</i>	37
<i>Ilustración 17 Por medio de este equipo de laboratorio, denominado WLB 10, se puede analizar las propiedades del espumado antes del proyecto.</i>	38
<i>Ilustración 18 Equipo de laboratorio WLB 10 S, de última generación.</i>	38
<i>Ilustración 19 Probeta base estabilizada con asfalto espumado (a) vs base estabilizada con asfalto (b). Fuente IMT diseño de bases estabilizadas con asfalto espumado.</i>	41
<i>Ilustración 20 Material granular sin estabilizador (a), estabilizada con asfalto (b) y con asfalto espumado (c).</i>	42
<i>Ilustración 21 Diagrama para el desarrollo del diseño para una base estabilizada con asfalto espumado. Fuente X Congreso Mexicano del Asfalto, Fidel García Hernández, Domingo Eduardo Campos Hernández y Horacio Delgado Alamilla .</i>	43
<i>Ilustración 22 Prueba de los límites de consistencia, cabe mencionar que esta prueba solo se le hace al material pétreo.</i>	44
<i>Ilustración 23 Gráfica límites granulométricos para bases espumadas.</i>	45
<i>Ilustración 24 Molde utilizado para la variante "D".</i>	46
<i>Ilustración 25 Recipiente llamado vasije y varilla estandarizada para medir la expansión del asfalto espumado.</i>	48
<i>Ilustración 26 Colapso del asfalto espumado después de realizar la descarga.</i>	49
<i>Ilustración 27 Gráfica para obtención del porcentaje de agua óptimo para el espumado.</i>	50

<i>Ilustración 28 Equipo Indirect Tensile Strength que se utiliza para conocer el esfuerzo máximo admisible antes de producirse una grieta o falla en los asfaltos espumados.</i>	52
<i>Ilustración 29 Fresado de los materiales.</i>	57
<i>Ilustración 30 Almacenamiento del material fresado.</i>	57
<i>Ilustración 31 Una vez que se freso la carpeta y la base, se hace circular un compactador neumático con el objetivo de detectar hundimientos en la estructura.</i>	58
<i>Ilustración 32 Elaboración del asfalto espumado.</i>	59
<i>Ilustración 33 Proceso de compactación de la base estabilizada.</i>	60
<i>Ilustración 34 Compactación secundaria.</i>	60
<i>Ilustración 35 Compactación neumática.</i>	61
<i>Ilustración 36 Estados de la unión americana donde se está empleando el asfalto espumado. Fuente Properties of Foamed Asphalt.</i>	63
<i>Ilustración 37 En funcionamiento continuo las 24 horas del día, incluso bajo condiciones climáticas extremas: uno de los tres trenes de reciclaje de Wirtgen, compuesto de la máquina WR 2500 y de la mezcladora de suspensión WM 400, durante la rehabilitación económica.</i>	66
<i>Ilustración 38 En funcionamiento continuo las 24 horas del día, incluso bajo condiciones climáticas extremas: uno de los tres trenes de reciclaje de Wirtgen, compuesto de la máquina WR 2500 y de la mezcladora de suspensión WM 400, durante la rehabilitación económica.</i>	68
<i>Ilustración 39 Una prueba del rendimiento de la máquina WR 2500: en esta obra en Noruega, el abastecimiento de ligante de este carrotanque fue suficiente para reciclar 2,500 m² en poco menos de 2 horas. Fuente Betún Espumado de Wirtgen.</i>	69

Lista de Tablas

<i>Tabla 1 Niveles de servicio, dentro de la red vial federal. (Fuente SCT).</i>	11
<i>Tabla 2 Determinación del pretratamiento del filler. Fuente Diseño de una base estabilizada con asfalto espumado AMAAC.</i>	44
<i>Tabla 3 Límites de abertura de malla, para el diseño de la granulometría.</i>	45
<i>Tabla 4 Límites para el asfalto espumado. Fuente Wirtgen 2012.</i>	49
<i>Tabla 5 Límites mínimos de asfalto espumado y valores obtenidos. Fuente AMMAC.</i>	51
<i>Tabla 6 Características mínimas de aceptación para el nivel I. Wirtgen 2012.</i>	53
<i>Tabla 7 Parámetros mínimos de diseño nivel II.</i>	54
<i>Tabla 8 Parámetros mínimos de diseño para nivel III.</i>	55
<i>Tabla 9 Valores de aceptación para los parámetros de diseño, desde todas sus etapas. Fuente X Congreso Mexicano del Asfalto, Fidel García Hernández, Domingo Eduardo Campos Hernández y Horacio Delgado Alamilla que se derivan de la Wirtgen Cold Recycling Technology del Grupo Wirtgen .</i>	56

Capítulo 1 Generalidades

Introducción

En México, contamos con una red carretera de más de 360 mil kilómetros (ilustración 1), de los cuales 127 mil, son pavimentados; de ellos el 95% corresponde a concreto asfáltico. Actualmente, la red carretera federal, cuenta con más de 40 mil kilómetros, por donde transita la mayoría de la carga comercial que se mueve en el territorio nacional.

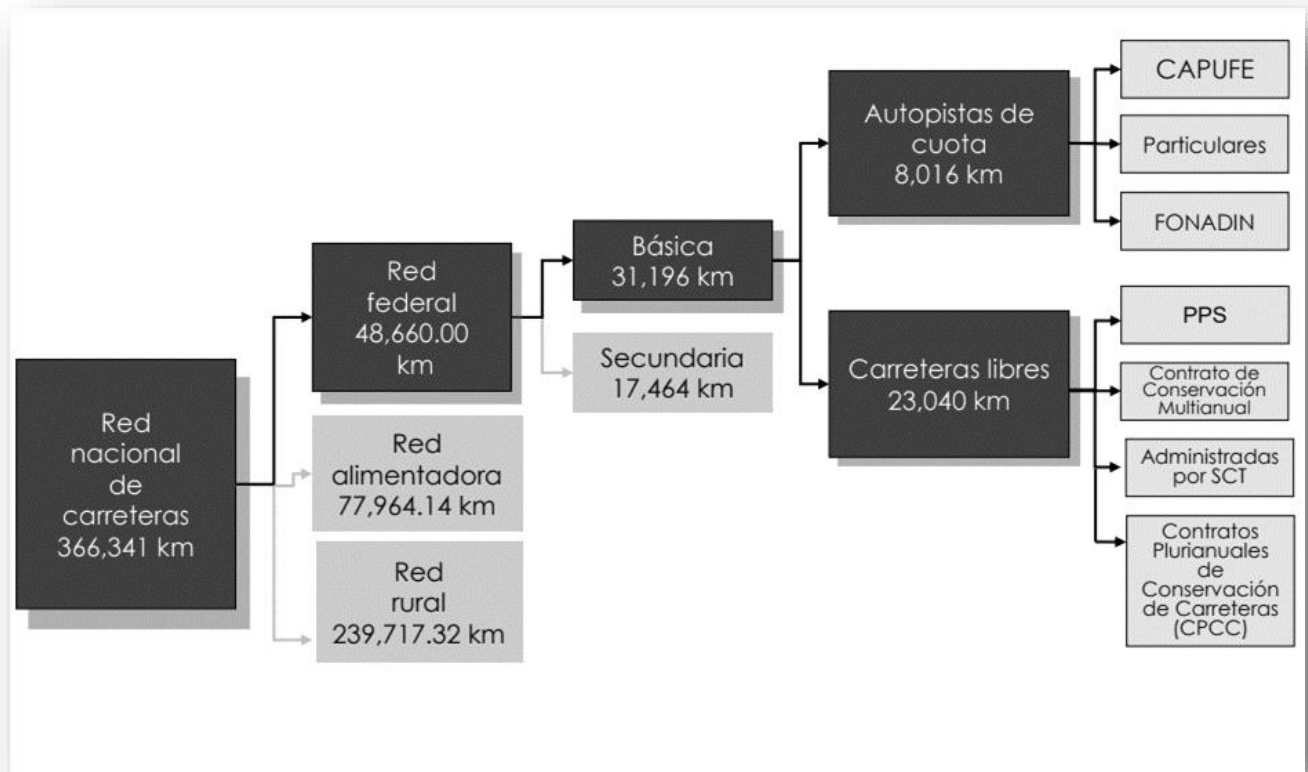


Ilustración 1 Clasificación de la red nacional. Fuente SCT.

Se espera que México siga creciendo y fortaleciéndose en el comercio y la industria, en conjunto con las comunicaciones y transportes, que son los principales motores de la economía y bienestar, e indican el índice de desarrollo del país.

La modernización del sistema carretero es el punto clave para el desarrollo, ya que el principal medio de transporte nacional es el terrestre.

Lo anterior demanda un sistema carretero que ofrezca mayor y mejor movilidad en el transporte de bienes y servicios.

Dentro de la longitud de la carretera federal se cuenta con 15 ejes troncales (ilustración 2), a los cuales se destina la mayor parte del presupuesto para este sector, debido al carácter de importancia de las mercancías y volúmenes que por ahí transitan diariamente; sin embargo, existe un mayor número de kilómetros sin pavimentar por todo el país.



Ilustración 2 Ejes troncales de México donde diariamente se mueve 3 millones de pasajeros y 470 millones de toneladas de carga. Fuente SCT.

Los niveles de servicio, según la SCT, en la mayoría de su red se encuentra en A, B y C considerándolos estos, como estables (tabla 1).

NIVEL DE SERVICIO	LONGITUD	%
A	5,658.44	13.33
B	16,638.14	39.19
C	11,846.45	27.90
D	4,851.90	11.43
E	2,695.49	6.35
F	767.86	1.80
TOTAL	42,458.28	100%

Tabla 1 Niveles de servicio, dentro de la red vial federal. (Fuente SCT).

En base a la tabla 1, el 80.42% de la red carretera se encuentra estable, la velocidad de operación aun es satisfactoria en el 11.43% acercándose a inestable y el 8.15% tiene problemas de saturación y de congestionamiento.

Algo digno de destacar, es el hecho que, el 60% de los tramos actuales, se construyeron hace más de 40 años, con criterios de diseño, especificaciones y materiales diferentes a los exigidos en la práctica moderna. El tipo de vehículo actual, dimensiones y pesos considerados, han cambiado notablemente, acusando un crecimiento mayor que no se previó en el diseño original de estas carreteras.

Los volúmenes de tránsito que circulan hoy por la red federal son mucho mayores, incrementándose en algunos tramos, un 50% el tránsito de vehículos pesados; debido principalmente a las políticas en los últimos sexenios de nuestros gobernantes, enfocadas al desarrollo del autotransporte, dejando de lado al sector ferroviario como una alternativa de transporte de carga masiva y/o pasajero de modo seguro, menor huella de carbono y económico; por citar un ejemplo.

La importancia del sector carretero ha generado la necesidad de conservar, modernizar y extender la infraestructura; sin embargo, es de suma importancia avanzar en el estudio y caracterización de nuevos materiales; en la revisión, puesta al día y mejoramiento de los métodos actuales de diseño y en la ejecución de investigaciones experimentales con pruebas de simulación de desempeño de asfaltos y mezclas asfálticas que representen de mejor manera las condiciones a las que estarán sometidas durante su construcción y operación.

Por ello las mezclas asfálticas en los pavimentos flexibles son sumamente importantes, no solo por los volúmenes requeridos, sino porque constituyen la parte más costosa del proyecto, y la superficie por la que transitan diariamente millones de vehículos.

La relativamente nueva tecnología del asfalto espumado puede verse como una alternativa de un tipo de mezcla asfáltica con conciencia ecológica y económica; para el desarrollo del sector carretero.

Actualmente en México se utilizan mezclas asfálticas, clasificadas de acuerdo con la norma N-CMT-4-05-003/08, *Calidad de Mezclas Asfálticas para Carreteras* (ilustración 3), en las que se identifica tres tipos. Algunos maestros o autores las han clasificado de dos maneras: según su temperatura y su comportamiento; sin embargo, consideraremos la normatividad oficial, enfocándonos, por ser el objeto de estudio de esta tesina, al asfalto espumado con mezcla asfáltica en frío.

Cabe mencionar, que la utilización de mezcla asfáltica en frío con asfalto espumado, conlleva la técnica de reciclaje RAP, que a su vez esta se divide en tres tipos, que más adelante abordaremos detalladamente.

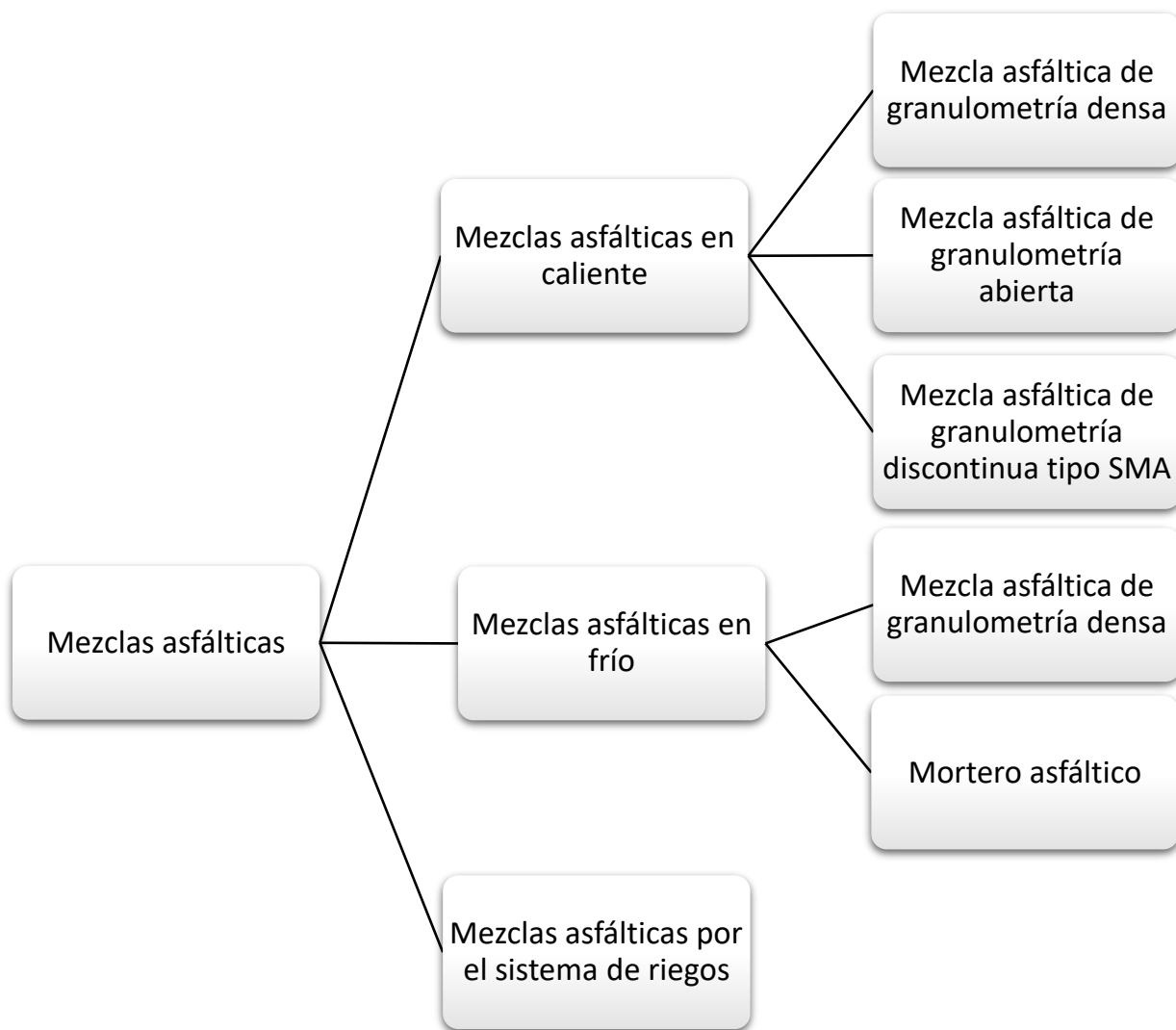


Ilustración 3 Clasificación de las mezclas asfálticas según la Norma N-CMT-4-05-003/08.

1.1 Planteamiento del problema

En nuestro país existe un grave problema en cuanto a carreteras, como ya se había mencionado anteriormente, debido a tres grandes causas: un mal diseño de las mezclas asfálticas, deficiente construcción y falta de un programa permanente de mantenimiento, lo cual se traduce en el mal estado de la red. Cabe destacar que cada causa tiene un trasfondo y responsabilidades que inciden en los malos resultados, ya sea económico, político o social.

Para fines de este trabajo de investigación, nos enfocaremos básicamente en dar a conocer una técnica de mezcla asfáltica relativamente nueva en nuestro país, poco conocida, y desarrollada: el asfalto espumado.

Existen dos empresas a nivel nacional que cuentan con la tecnología para construir con asfalto espumado. El número de máquinas disponibles para su aplicación en el país son pocas, los manuales de Wirtgen son de difícil acceso, existe poca experiencia, nula normatividad mexicana que hable al respecto; pero que sin embargo recientemente, se ha publicado una investigación al respecto por parte el Instituto Mexicano del Transporte.

1.2. Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Conocer la tecnología del asfalto espumado desde sus orígenes hasta la actualidad y su correcto empleo.

1.2.2 Objetivos Particulares

- Presentar una breve historia del origen del asfalto espumado y sus definiciones.
- Dar conocer el diseño de una base estabilizada con asfalto espumado.
- Describir la maquinaria KMA 220, que se emplea para la construcción de reciclados de mezcla asfáltica en frío por medio de la tecnología de asfalto espumado.
- Mostrar el proceso constructivo con una planta recicladora KMA 220.
- Comentar las experiencias del asfalto espumado en algunos países del mundo.

1.3 Hipótesis de Investigación

El asfalto espumado puede ser una técnica que resulte atractiva y se propicie su crecimiento en México.

1.4 Metodología de Investigación

La presente tesina es un trabajo de Investigación sobre el asfalto espumado como una alternativa para utilizarse en nuestros caminos, pero que representa algo nuevo para nuestro país con todo y los enormes retos que conlleva la implementación de esta.

Para lograr los objetivos de la tesina, se comenzará (ver ilustración 4), con una recopilación y estudio de la bibliografía actualmente disponible, para después determinar su origen, cómo funciona, metodología de diseño, construcción, usos, ventajas y experiencias, así como conclusiones al respecto.

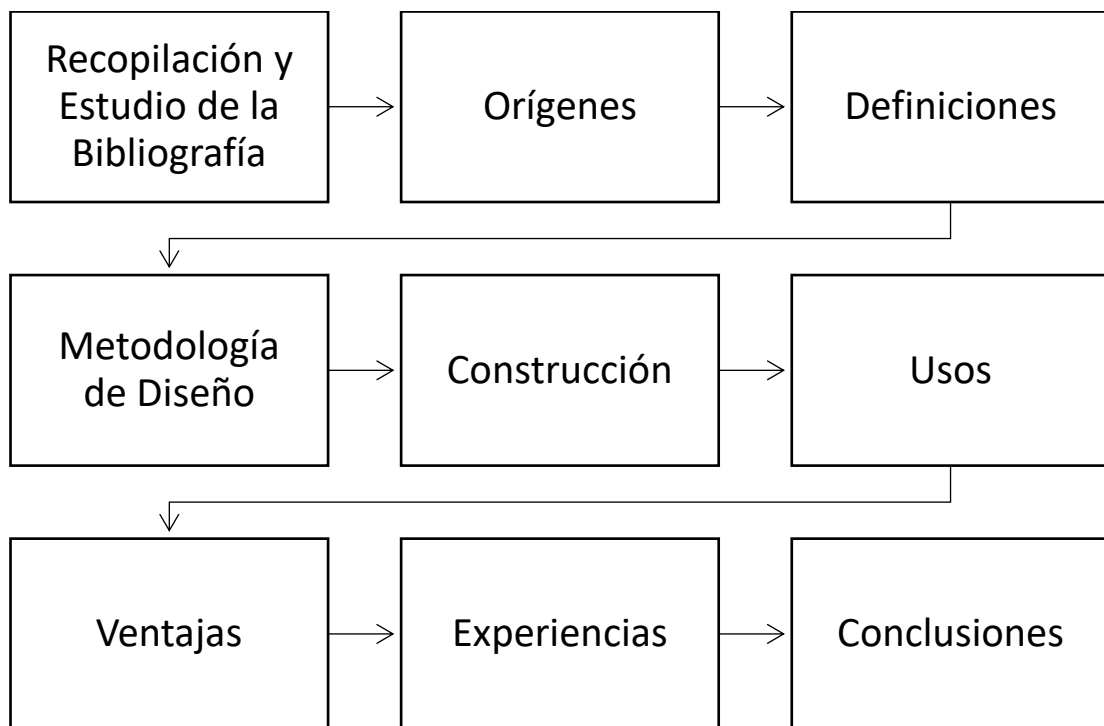


Ilustración 4 Metodología a seguir para el desarrollo del presente trabajo.

Capítulo 2 Mezclas asfálticas

Introducción

Tradicionalmente como capa final de rodadura, se han utilizado múltiples mezclas asfálticas, que de manera breve abordaremos sobre el tema.

Definiremos mezcla asfáltica como la combinación de agregados minerales, aglomerados mediante un ligante asfáltico y mezclados de tal manera que los agregados pétreos estén cubiertos por una película uniforme de asfalto.

Las propiedades relativas de estos materiales determinan las propiedades físicas de la mezcla y, el comportamiento funcional de la misma como parte del pavimento. Para ello dividiremos en tres clasificaciones, que a continuación se describen.

En el siguiente capítulo referente asfalto espumado también definiremos a la técnica de reciclaje RAP, que es una mezcla asfáltica que consideramos en el estudio, por ser parte de la metodología de diseño.

2.1 Mezclas asfálticas en caliente

Son las que como se menciona en su nombre, se mezclan en caliente, llevando cemento asfáltico y materiales pétreos, en una planta mezcladora estacionaria o móvil, que cuente con el equipo necesario para calentar las partes que conformen la mezcla.

Las mezclas asfálticas en caliente se subdividen en:

- Mezclas asfálticas de granulometría densa: es la mezcla en caliente, de granulometría continua y homogénea, conformada con cemento asfáltico y materiales pétreos con una granulometría bien definida, con tamaño nominal entre 37.5 mm (1½ in) y 9.5 mm (3/8 in); estas mezclas regularmente se utilizan en la construcción de carpetas asfálticas de pavimentos nuevos en los que se busca, debido a las necesidades de proyecto, una alta eficiencia estructural, o en nivelaciones y refuerzo de pavimentos que ya estén.
- Mezcla asfáltica de granulometría abierta: es la mezcla en caliente, de granulometría uniforme, homogénea y con un alto porcentaje de vacíos, conformada con cemento

asfáltico y materiales pétreos de granulometría uniforme, con un tamaño nominal entre 12.5 mm (1/2 in) y 6.3 mm (1/4 in).

Estas mezclas usualmente en México se utilizan para formar capas de rodadura, donde no tiene función estructural y generalmente se construyen sobre una carpeta de granulometría densa, con el objetivo principal de obtener los requerimientos de calidad de rodamiento del tránsito; hace posible que el agua de lluvia sea removida por los huecos, ocupando los vacíos de la carpeta incrementando la fricción de las llantas con la superficie de rodadura, minimizando el acuaplaneo, se reduce la cantidad de agua que se impulsa sobre los vehículos adyacentes dicho de otra manera al rocío, además, se mejora la visibilidad del señalamiento horizontal y se reduce el ruido producido por el rodamiento de la rueda sobre el pavimento.

Las mezclas asfálticas de granulometría abierta sugieren que no deben construirse en zonas susceptibles al congelamiento ni dónde la precipitación sea menor de 600 mm por año.

- Mezcla asfáltica de granulometría discontinua, tipo SMA: es la mezcla en caliente, uniforme y homogénea, elaborada con cemento asfáltico y materiales pétreos de granulometría discontinua, con tamaño nominal 19.0 mm (3/4 in) y 9.5 mm (3/8 in). Estas mezclas regularmente se usan para formar capas de rodadura, aunque también pueden utilizarse en capas inferiores en carreteras de alto tránsito.

Cuando son utilizadas como capas de rodadura su finalidad principal es mejorar las condiciones de desplazamiento de los vehículos respecto a una carpeta asfáltica convencional.

Al tener una elevada macro textura se evita que el agua de lluvia cree una película continua sobre la superficie del pavimento, ayudando a que la fricción de las llantas sea mayor; reduciendo el acuaplaneo; minimizando la cantidad de agua que se proyecta sobre los vehículos adyacentes, es decir, el rocío; ayuda a tener mejor visibilidad del señalamiento horizontal y se reduce el ruido por la fricción entre las llantas y la superficie de rodadura hacia el entorno.

2.2 Mezclas asfálticas en frío

Son las producidas en frío, en una planta mezcladora móvil, con emulsiones asfálticas o asfaltos rebajados y materiales pétreos (ilustración 5).

- Mezclas asfálticas de granulometría densa: es la mezcla en frío, de granulometría uniforme y homogénea, elaborada con emulsión asfáltica o asfalto rebajado y materiales pétreos, con tamaño nominal entre 37.5 mm (1½ in) y 9.5 mm (3/8 in). Regularmente se utilizan en los casos en que la intensidad de tránsito (ΣL) es igual a un millón de ejes equivalentes o menor, en donde no sea necesario de una alta resistencia de pavimentos nuevos y en carpetas para el refuerzo de pavimentos existentes, también como para la reparación de baches.
- Mortero asfáltico: es la mezcla en frío, de granulometría uniforme y homogénea, elaborada con emulsión asfáltica o asfalto rebajado, agua y arena con tamaño máximo de 9.53 mm (3/8 in). Regularmente se colocan sobre una base impregnada o una carpeta asfáltica, como capa de rodadura.



Ilustración 5 Colocación de mezcla asfáltica en frío.

2.3 Mezclas asfálticas por el sistema de riegos

Son las que se construyen mediante la aplicación de uno o tres riegos de un material asfáltico, intercalados con una, dos o tres capas sucesivas de material pétreo triturado de granulometría uniforme, colocado en tamaños decrecientes. Éstas se clasifican en carpetas de uno, de dos y de tres riegos.

Regularmente se colocan sobre una base impregnada o una carpeta asfáltica, nueva o existente, como capa de rodadura con la finalidad de proporcionar resistencia al derrapamiento y al pulimiento.

2.4 Características de las Mezclas Asfálticas

Los materiales asfálticos proporcionan superficies continuas y cómodas para la rodadura de los vehículos. No obstante, hay que establecer un balance entre la durabilidad, rugosidad, impermeabilidad, y otras características útiles o imprescindibles para el usuario.

Resistencia a:

- Deformación
- Fatiga
- Agrietamiento térmico
- A efectos del clima, como: temperatura y humedad

Propiedades de agregados cemento Portland y asfalto:

- Diseño correcto (granulometría, forma de la partícula, etc.)
- Resistencia de los agregados
- Asfalto

Tenemos características especiales:

- Resistencia al pulimento
- Impermeable excepto con OGFC (Open Graded Frictio Course)
- Resistencia a la fricción mínima a 0.6

-
- No producir ruido
 - Evitar en la posibilidad, el desgaste en los neumáticos
 - Eliminación rápida del agua
 - Durable
 - Superficie con buenas propiedades de reflexión luminosa
 - Mínimo mantenimiento
 - Buena apariencia

Aspectos de sustentabilidad:

- Mínimo consumo de energía
- Mínima emisión de Bióxido de Carbono
- Reciclable

Capítulo 3

Asfalto espumado

Introducción

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

Regularmente se tiene que en pavimento el 95% de los recursos son naturales, mientras que el otro 5% pertenece a materiales artificiales, que regularmente representan el costo más alto. La construcción y conservación de nuevas carreteras requiere de muchos recursos tanto naturales, artificiales, como económicos.

El reúso de material de la carpeta asfáltica mediante su reciclaje en los últimos años se ha venido desarrollando, como herramienta y conciencia del cuidado al medio ambiente, generando un beneficio al país. La estabilización de bases hidráulicas con asfalto espumado es un ejemplo de cómo esta nueva tecnología se ha ido desarrollando en México.

La metodología de diseño está basada en el manual “Wirtgen Cold Recycling Technology”, mismo que no es un documento público, al cual puedan tener acceso todos los ingenieros interesados en diseñar una base estabilizada, así como también, para la realización de carpetas con asfalto espumado, en donde para su utilización se ocupa de tecnología especial para su diseño y construcción. Desafortunadamente hasta la fecha no se tienen referencias de parámetros mecánicos para el diseño estructural del pavimento.

El método que se le conoce en inglés como Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) es una de las metodologías utilizadas a nivel mundial para mitigar el consumo de los materiales en la construcción de pavimentos, es la reutilización del material de la carpeta asfáltica y es usado en el diseño y construcción de asfalto espumado.

Las diferentes técnicas utilizadas para la implementación del RAP se dividen en mezclas de reciclaje en frío, en tibio o en caliente, que dependen fundamentalmente de la temperatura de aplicación del material reciclado, (ilustración 6).

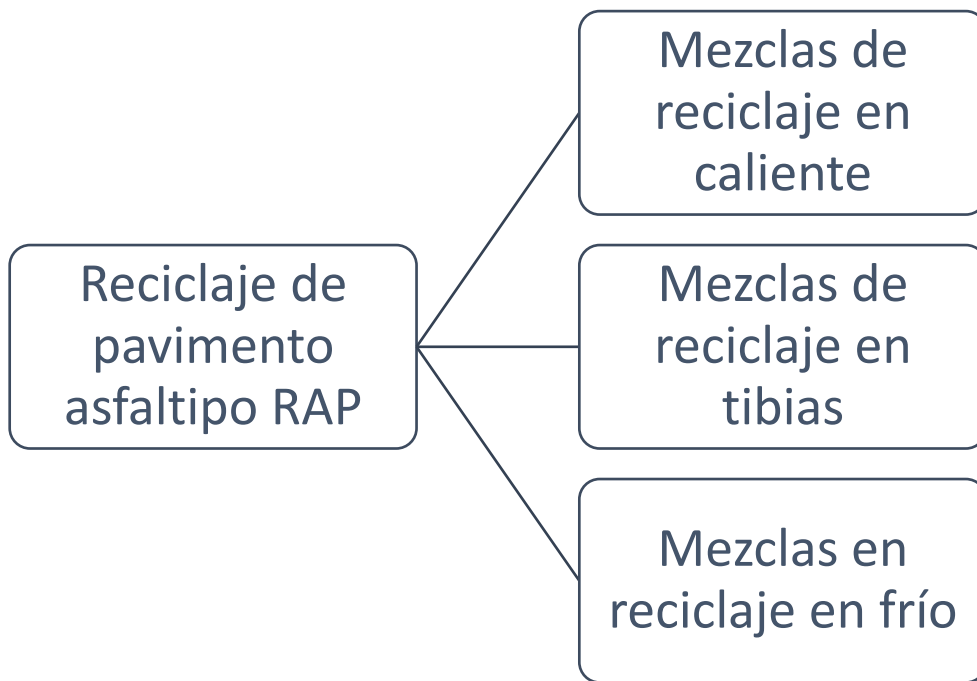


Ilustración 6 Tipos de mezclas de reciclaje de pavimento asfáltico, conocido como Rap.

Un ejemplo de mezcla de reciclaje en frío es Foamed Asphalt, el denominado asfalto espumado que sus temperaturas están entre 100-180 grados Celsius durante su producción.

El recuperado por medio de reciclaje en frío de RAP, regularmente se utiliza en la capa de base hidráulica acompañado de un agente estabilizador, siendo los más utilizados la emulsión asfáltica o el asfalto espumado.

Nosotros, en el posterior capítulo hablaremos del diseño de una base estabilizada con asfalto espumado, basado en el manual de “Wirtgen Cold Recycling Technology”, en una publicación del Instituto Mexicano del Transporte y en un documento por elaborado por la Asociación Mexicana del Asfalto.

3.1 El origen del asfalto espumado

Ladis Csanyi profesor en la estación experimental de ingeniería de la Universidad de IOWA EE. UU. en 1956, fue el pionero en lo que ahora se conoce como asfalto espumado; se preguntó qué ocurriría si se inyectará vapor al asfalto en caliente para formar la espuma, sin embargo, durante años se suscitó poco interés a este proceso.

Esta nueva invención a pesar de haberse creado en 1956, fue hasta 1968 que la organización Mobil Oil creó la primera cámara de expansión para mezclar agua fría en lugar de vapor con asfalto caliente para generar espuma, mejorándolo y transformándose así en un proceso más práctico, económico y menos peligroso. Pero no fue hasta 1991 que, derivado de un avance logrado al expirar en ese año los derechos sobre la patente de invención por Mobil Oil, que regresó a ser tema de atención nuevamente.

Diversos estudios internacionales han determinado parámetros para mejorar la eficiencia del proceso, relacionados con:

- Temperatura del asfalto
- Presión de inyección del asfalto en la cámara
- Viscosidad del asfalto
- Tamaño del recipiente donde se espuma en laboratorio
- Granulométrica
- Utilización de filler
- Contenido de RAP
- Cantidad de finos
- Contenido óptimo de asfalto

Con la llegada del económico reciclaje en frío como alternativa para rehabilitar carreteras en mal estado por el mundo, se dio inicio al auge alrededor de una tecnología, que sobresale por sus ventajas ecológicas y económicas, como lo es el asfalto espumado.

El reciclaje de los materiales de la estructura existente de la carretera, la cual, añadiéndole ligantes, puede volver a convertirse en una capa de base para una carretera nueva, esto es ahora un método de reciclaje, que hoy en día, a nivel mundial, representa una forma de

rehabilitar en manera económica. Casi desde un principio, Wirtgen ha participado activamente en el desarrollo de máquinas y equipos eficientes para este tipo de mezclas.

3.2 Definiciones

En la búsqueda de nuevas formas de construir caminos en el mundo el hecho de haberse encontrado con el asfalto espumado representa una alternativa más; por lo cual a continuación pasamos a definir algunos conceptos, principalmente la del asfalto espumado.

- **Asfalto Espumado**

El asfalto espumado se forma cuando se espuma asfalto caliente (aproximadamente 2 a 3%), añadiendo una pequeña cantidad de agua.²

El asfalto que para ello se utiliza, es asfalto usual en el comercio y que, también se emplea en la construcción de carreteras de asfalto.

En el momento en el que se añade agua al asfalto caliente, el agua se evapora de golpe, produciendo una expansión explosiva del asfalto en el vapor de agua saturado, debido a la cual el volumen se multiplica de 15 a 20 (ilustración 7).



Ilustración 7 Muestra como cantidades de agua y aire, logran en el asfalto caliente, una expansión, denominada espuma. Fuente Wirtgen.

² Wirtgen Group, betún espumado, 2003.

- Manual de Wirtgen Cold Recycling Technology
Manual para el diseño de Wirtgen por medio de reciclaje en frío, asfalto espumado, (ilustración 8).

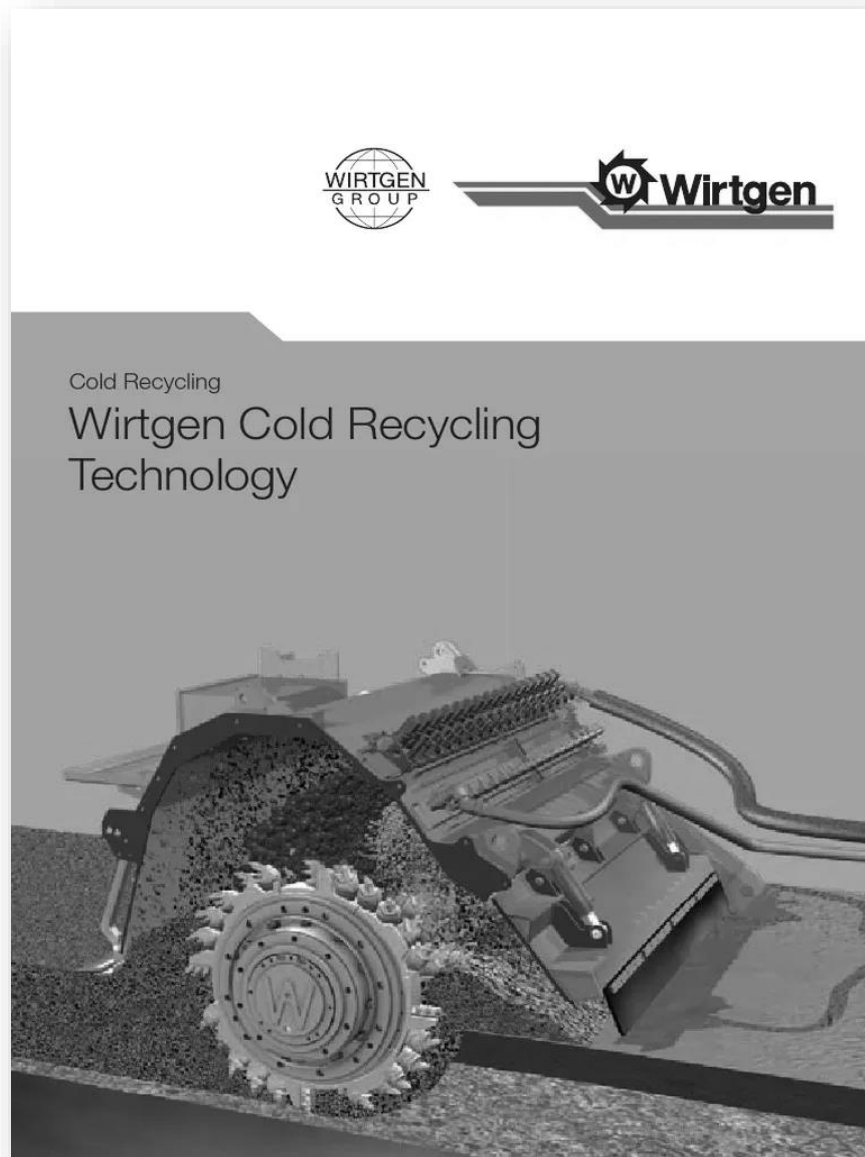


Ilustración 8 Carátula del Manual Wirtgen Cold Recycling Technology.

- Reciclaje del pavimento asfáltico (Reclaimed Asphalt Pavement)

Pavimentos removidos que contienen asfalto y agregados, técnica de reciclaje que puede ser en caliente, tibio o frío, (ilustración 6).

- Wirtgen Group

Proveedora y empresa de maquinaria especializada para la construcción de asfalto espumado, (ilustración 9).



Ilustración 9 Organización inventora de la primera cámara de expansión para la elaboración del asfalto espumado.

3.3 La Tecnología de asfalto espumado

Consiste básicamente en inyectar una pequeña cantidad de agua fría con aire comprimido sobre asfalto caliente, todo ello llevado a cabo en una cámara de expansión diseñada específicamente para este propósito (vea ilustración 10).

Al estar el asfalto en forma de espuma, se tiene un estado temporal de baja viscosidad, y, por ende, puede agregarse y mezclarse con materiales a temperatura ambiente ³.

La mezcla de asfalto espumado funciona encapsulando y uniendo las pequeñas partículas finas, las cuales, en conjunto con los agregados, trabajan como pequeños puntos de

³ Instituto Mexicano del Transporte, Publicación 519, Diseño de una base estabilizada con asfalto espumado, 2018.

soldadura⁴ (vea ilustración 20). Ello se traduce en una mezcla rígida propia por el agregado y flexible por los ahora nuevos puntos de soldadura de asfalto.



Ilustración 10 Teniendo en cuenta la presión y la temperatura, en las cámaras de expansión se produce asfalto espumado de excelente calidad.

La mezcla en frío de asfalto espumado es apropiada para distintas aplicaciones, por ejemplo:

- Para producir capas de rodadura
- Base en la construcción de carreteras y caminos secundarios
- Superficies de estacionamiento
- Capas de base de carreteras muy frecuentadas

⁴ Wirtgen Cold Recycling Technology, 2012, ¿Cómo funciona la mezcla de asfalto espumado?.

3.4 El propósito de espumar

Es hacer que sea más fácil de distribuir el asfalto en materiales que se encuentran a temperatura ambiente. El asfalto líquido a alta temperatura sin espumar, al entrar en contacto con partículas de agregado frío, se convertiría inmediatamente en glóbulos y por lo tanto no puede ser trabajado completamente.

Por otro lado, el asfalto espumado puede ser introducido en la mezcla de manera bastante uniforme. Un proceso análogo de la mezcla en frío es el efecto que produce batir una clara de huevo, la que puede ser mezclada con harina seca.

La intensidad y la eficiencia del espumado se pueden controlar óptimamente, mediante la realización regulada, teniendo en cuenta las condiciones físicas y ambientales, tales como presión y temperatura. Este proceso se realiza en cámaras de expansión individuales, en las cuales se inyecta el agua en el flujo de asfalto calentado a 180°C. La inyección se lleva a cabo a una presión de aproximadamente 5 bares.

El asfalto espumado producido de esta manera in situ, escapa de las cámaras de expansión a través de una abertura tubular y puede ser empleado directamente, incorporándolo a la mezcla de minerales a estabilizar.

3.5 Calidad del Asfalto Espumado

Para producir asfalto espumado además de requerir ajustes de parámetros tales como la temperatura del asfalto, la cantidad y naturaleza del agua, también se requiere regular las condiciones en las que se recolecta la espuma. Con ese propósito, se utilizan dos parámetros en esta selección, a saber:

- Razón de expansión (Re)
- Vida media ($\tau_{1/2}$),

los cuales dependen de la temperatura y la forma del recipiente en donde se recolecta la espuma.

La calidad del producto final, es decir, el asfalto espumado, es obtenida principalmente, por los factores expansión y vida media (ver ilustración 11).

Expansión se define como la relación entre el volumen máximo alcanzado del asfalto en estado espumado y el volumen del asfalto sin espumar. Normalmente, la expansión del asfalto espumado produce una multiplicación del volumen original del asfalto por 15 a 20.

Por vida media, se entiende el tiempo transcurrido que tarda la espuma en sedimentarse hasta la mitad del volumen máximo obtenido, una vez terminado el espumado. Después de un tiempo, la espuma del asfalto se sedimenta. La vida media se indica en segundos y, por lo general, dura entre 5 y 10 segundos.

Básicamente se puede decir: cuanto mayor sea la expansión y cuanto mayor sea la vida media, tanto mejor será la calidad del asfalto espumado.

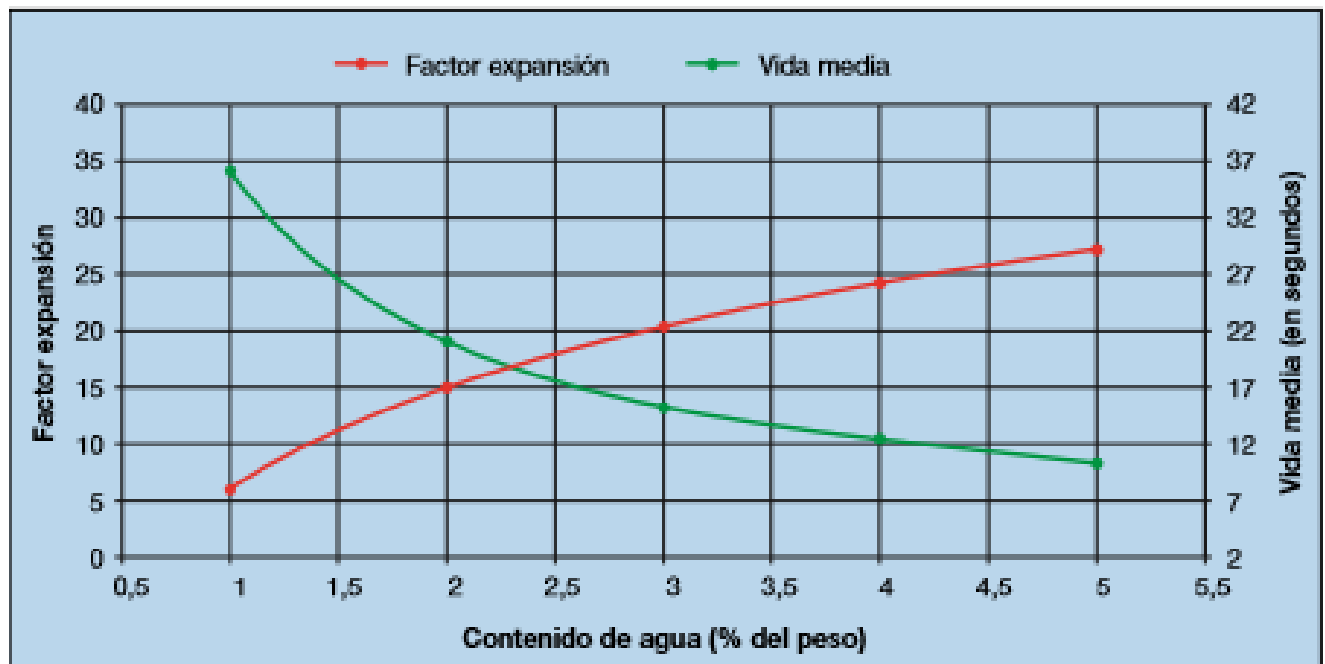


Ilustración 11 La calidad del asfalto espumado es de suma importancia tener presente, que los factores vida media y expansión se desarrollan en sentido contrario, mientras más aumente la cantidad de agua agregada. Fuente publicación IMT 519.

3.6 Maquinaria

Para el empleo de asfalto espumado es necesario de maquinaria especializada, en el diseño y construcción y que en la actualidad en México solo se cuenta con dos empresas con el equipo para su elaboración.

3.6.1 Desarrollo de la Maquinaria para la elaboración del asfalto espumado

Desde 1998 cuando por primera vez la organización Mobil Oil desarrolló la primera cámara de expansión para el proceso de inyección de agua, aire y asfalto caliente, se han venido desarrollando varios equipos hasta 2018, donde principalmente se ha buscado mejorar la presión de inyección del asfalto en la cámara, el tamaño del recipiente donde se espuma para aumentar la capacidad, etc.

En la siguiente ilustración 12, representamos una breve línea del tiempo, mostrando como ha sido en transcurso de los años, las etapas del desarrollo de la tecnología de maquinaria Wirtgen para el reciclaje en frío empleando el asfalto espumado.



Ilustración 12 Breve línea del tiempo de las etapas del desarrollo de las plantas productoras de asfalto espumado.

El equipo más nuevo que existe para la elaboración de asfalto espumado es la denominada planta mezcladora móvil para el reciclado en frío KMA 220 de Wirtgen.

3.6.2 Descripción de la Maquinaria

El espumado se realiza en una serie de cámaras de expansión separadas y equipadas con tuberías, a través de las cuales el asfalto se inyecta de manera uniforme sobre todo el ancho de trabajo. El espumado, así como las dosificaciones se controlan por medio de microprocesador, teniendo en cuenta la anchura de trabajo, la profundidad de trabajo, la velocidad de avance y la densidad del material a procesar. La adición de agua y de aire se realiza mediante tuberías separadas.

La calidad del ligante asfalto espumado depende decisivamente de la tecnología de inyección aplicada. Para el desarrollo de las barras de inyección de alta calidad, empleadas en las máquinas, fueron de trascendental importancia una serie de características relevantes en su aplicación:

El dispositivo de calefacción controlado por termostato se encarga de la temperatura óptima de servicio en el sistema, antes y durante la producción del asfalto espumado, por lo que no se requiere un lavado complicado del equipo al interrumpir la aplicación o al finalizar el trabajo.

En el proceso de obtención del asfalto espumado (ver en la ilustración 13), mientras un equipo avanza va recolectando el material reciclado por medio de un tambor fresador, en el cual, se inyecta agua, asfalto caliente y aire.

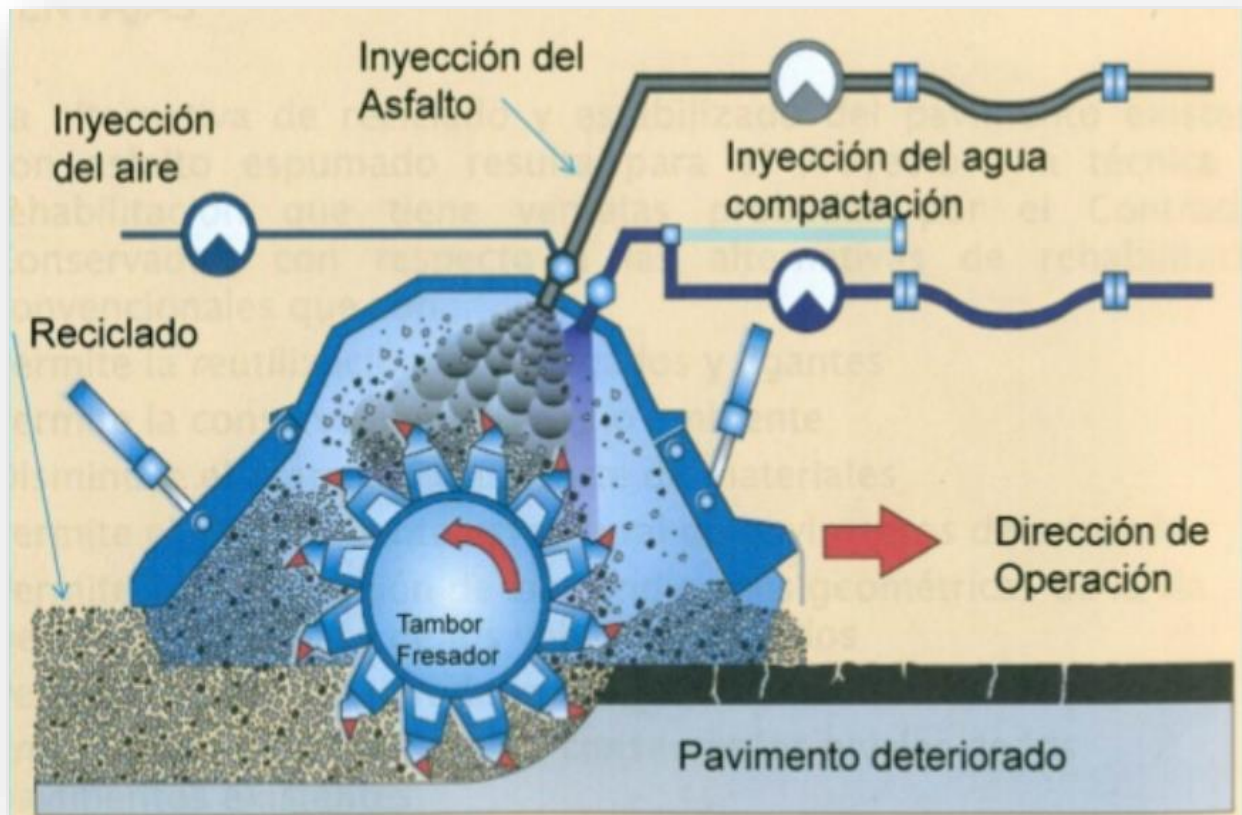


Ilustración 13 Obtención del asfalto espumado. Fuente Wirtgen.

Planta mezcladora en frío KMA 220

Este equipo integra todo el proceso para la producción del asfalto espumado; además esta compacta máquina es sumamente eficaz, accionada por un motor de Diesel, capaz de producir una cantidad asombrosa de 220 t/h de aglomerado de primera calidad (ver ilustración 14).



Ilustración 14 Especificaciones Técnicas de KMA 220.

Con un rendimiento de 200 t/h se produce cada seis minutos, material reciclado en frío suficiente para cargar un camión de 20 t. De esta manera es posible extender, cada hora una capa de base de largo, ancho de 4 m y 15 cm de espesor.

La producción con esta planta en sitio se compone; además de la KMA 220, de una conexión de suministro de agua, que puede estar ubicada a lado izquierdo o derecho, según mejor convenga, cargador frontal para el suministro de los agregados, pipa con el asfalto, silo de cemento o cal y respectivamente su transporte de la mezcla (ver ilustración 15).

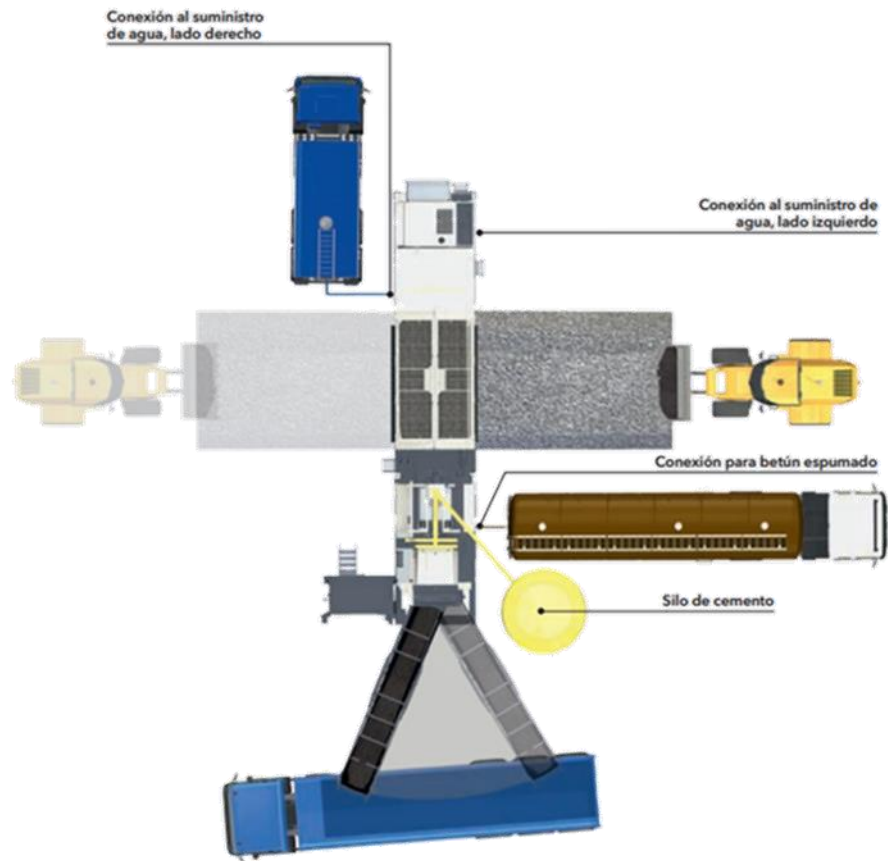


Ilustración 15 Planta de mezclado en sitio y su esquema de producción de asfalto espumado. Fuente Wirtgen maquinaria.

En posición de transporte la KMA 220, de largo mide 14.71 m, 2.50 m de ancho, por 4.00 m de alto, convirtiéndola en un vehículo que puede ser desplazado al lugar de la obra, con un peso de 30.50 t (ver ilustración 16).

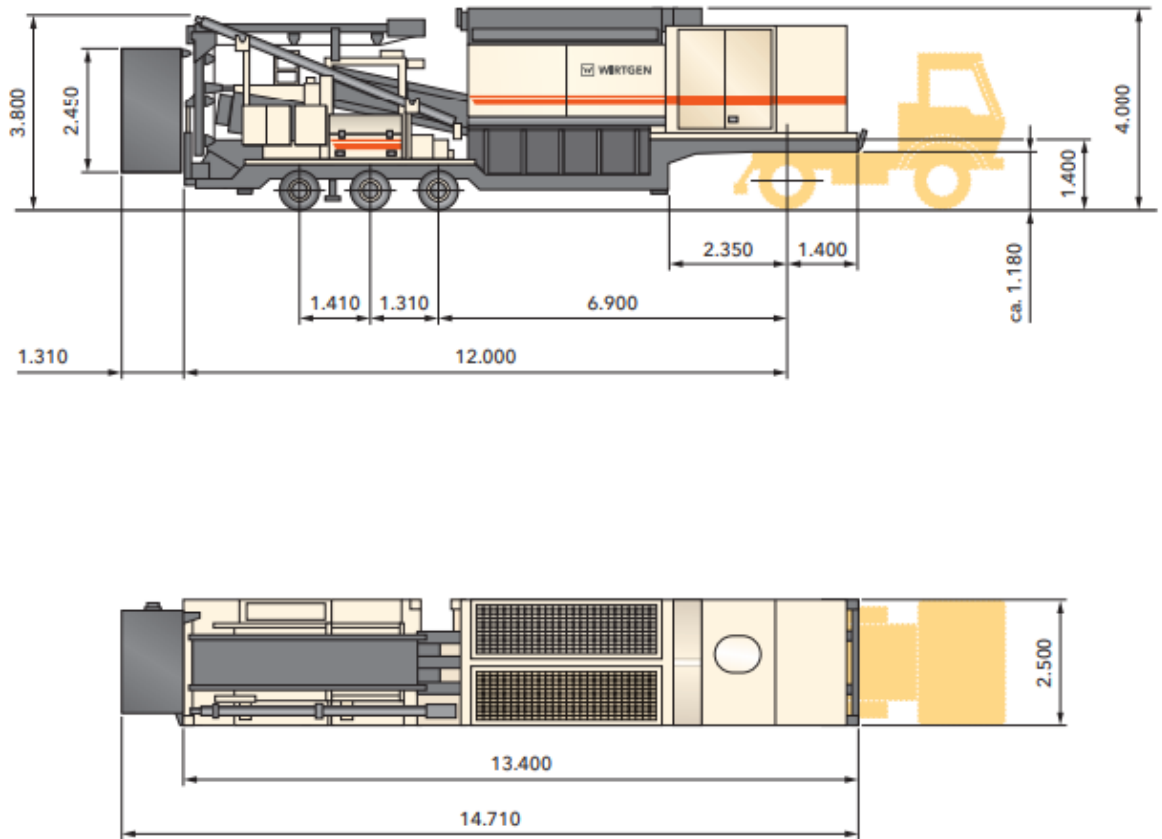


Ilustración 16 Dimensiones en metros de la KMA 220 en posición de ser transportada. Fuente Wirtgen maquinaria.

3.7 Equipo de laboratorio para el análisis de las propiedades con WLB 10

A fin de optimizar las propiedades del espumado del asfalto empleado, es posible efectuar un análisis de idoneidad por medio del equipo móvil de laboratorio, (ilustración 17), para el análisis de asfalto espumado WLB 10, antes de comenzar con las obras.



Ilustración 17 Por medio de este equipo de laboratorio, denominado WLB 10, se puede analizar las propiedades del espumado antes del proyecto.

Para determinar las condiciones ambientales óptimas durante el espumado, se efectúan una serie de ensayos, variando la temperatura del asfalto y las cantidades añadidas de agua y de aire (ilustración 18). Una vez terminadas las series de ensayos será posible inyectar la espuma de asfalto directamente en un mezclador de laboratorio y emplearlo en la producción de probetas para el análisis de idoneidad de los aglomerados producidos.



Ilustración 18 Equipo de laboratorio WLB 10 S, de última generación.

Capítulo 4

Procedimiento para el
diseño de una base estabilizada con asfalto
espumado, construcción y control de calidad

Introducción

En el diseño de bases estabilizadas con asfalto espumado, existe como la referencia principal el Manual de Wirtgen, sin embargo, la Asociación Mexicana del Asfalto y el Instituto Mexicano del Transporte; cuentan con sus propias investigaciones y aportaciones; en donde parte del diseño será con base a estas referencias bibliográficas.

El método de diseño, cualquiera que se utilice; involucra la selección del agregado, selección del asfalto, compactación de los especímenes de prueba, el cálculo de los parámetros volumétricos y la determinación del contenido de asfalto óptimo.

Determinar la combinación y graduación económica de los agregados dentro de los límites especificados, y el contenido de asfalto, es el objetivo del diseño de las mezclas asfálticas, que conducen a una mezcla que tenga lo siguiente:

- Asfalto suficiente para cubrir por completo las partículas de agregado e impermeabilizarlas, y pegarlas para asegurar un pavimento durable con una compactación adecuada.
- Estabilidad suficiente para satisfacer los requerimientos de servicio y las demandas del tráfico sin deformación ni desplazamiento.
- Vacíos suficientes en la mezcla total compactada para dejar un espacio de reserva para la expansión del asfalto y para una ligera compactación adicional, que, con las cargas del tráfico se va a producir.
- Trabajabilidad suficiente para permitir la colocación y compactación de la capa de pavimento y una operación eficiente de construcción.

4.1 Diseño de una base estabilizada con asfalto espumado

La reutilización de la estructura del pavimento sirve para una mezcla de asfalto espumado, que puede servir para elaborar una carpeta o una base de alta calidad estabilizada con asfalto espumado.

Con la implementación del asfalto espumado como estabilizador, se crea una unión discontinua en el material granular, (ilustración 19), aumentando la cohesión, así como también su susceptibilidad a la humedad, que de igual forma se mantiene el ángulo de fricción interna de la base hidráulica.

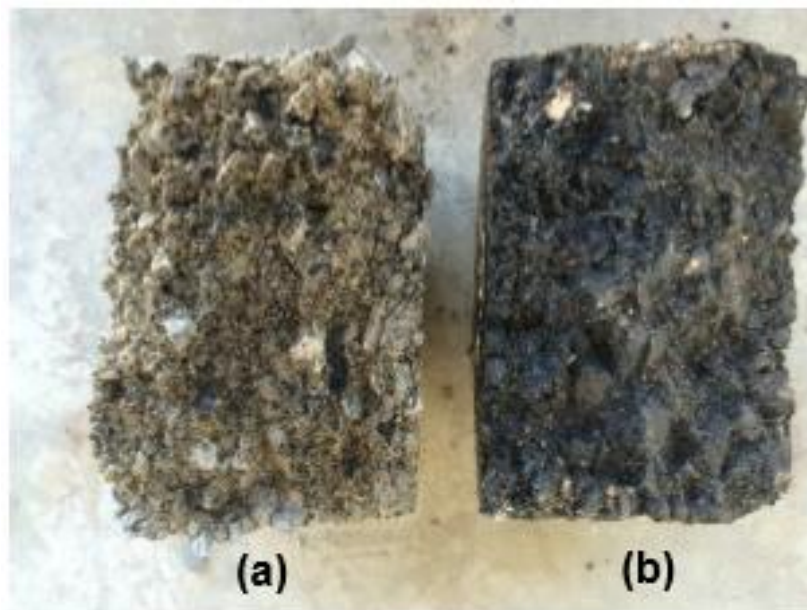


Ilustración 19 Probeta base estabilizada con asfalto espumado (a) vs base estabilizada con asfalto (b). Fuente IMT diseño de bases estabilizadas con asfalto espumado.

Las bases estabilizadas con asfalto espumado el recubrimiento del material granular no es completo, y las discontinuas soldaduras aún mantienen beneficios al aumentar las propiedades cortantes del material (ver ilustración 20).

Cabe mencionar que una base estabilizada ya sea con cemento, asfalto, o asfalto espumado, representan diferentes rigideces, flexibilidad o ligaduras. Por ejemplo, dentro de una base estabilizada con cemento, existe mayor rigidez y que por lo regular los porcentajes de cemento van dentro de 2 a 4%, pero su flexibilidad es nula; por otro lado,

una base estabilizada con asfalto que van de 3.5 a 6% del agente estabilizador, su rigidez es nula, pero su flexibilidad mayor con ligaduras continuas, al igual que con el cemento.

Por otro lado, las uniones de una base estabilizada con asfalto espumado representan un punto intermedio; es decir, muestra rigidez y flexibilidad, pero su unión es discontinua, agregándose de 2 a 3% del estabilizador, traduciéndose esto en una opción económica.



Ilustración 20 Material granular sin estabilizador (a), estabilizada con asfalto (b) y con asfalto espumado (c).

Para el diseño de una base estabilizada con asfalto espumado, basado en la metodología del manual de Wirtgen 2012, se debe tener en cuenta las diferentes etapas de análisis, que a continuación describiremos y abordaremos:

- ➔ Etapa 1: Caracterización de los materiales a utilizar.
- ➔ Etapa 2: Determinación de la granulometría de diseño y compactación.
- ➔ Etapa 3: Determinación de las propiedades espumantes del asfalto
- ➔ Etapa 4: Diseño de la mezcla de materiales (fórmula de trabajo)
 - ✚ Nivel 1: Determinar la necesidad de “filler Activo”.
 - ✚ Nivel 2: Determinar el contenido óptimo de asfalto espumado.
 - ✚ Nivel 3: Determinación de propiedades mecánicas.

El desarrollo del diseño conlleva al material asfáltico, realizar una selección y muestreo, espumarlo, revisar que la expansión y vida media, sean aceptables, de acuerdo con los parámetros, logrando así el espumado óptimo.

Seguido se lleva el análisis de la proporción representativa, más su densidad máxima, aplicando pruebas de caracterización como lo es granulometría y límites de atterberg.

Junto con la anterior dicho, se procede a los niveles de diseño, mediante pruebas realizadas en laboratorio, que más adelante abordaremos, obteniendo nuestra formula de trabajo (ver ilustración 21).

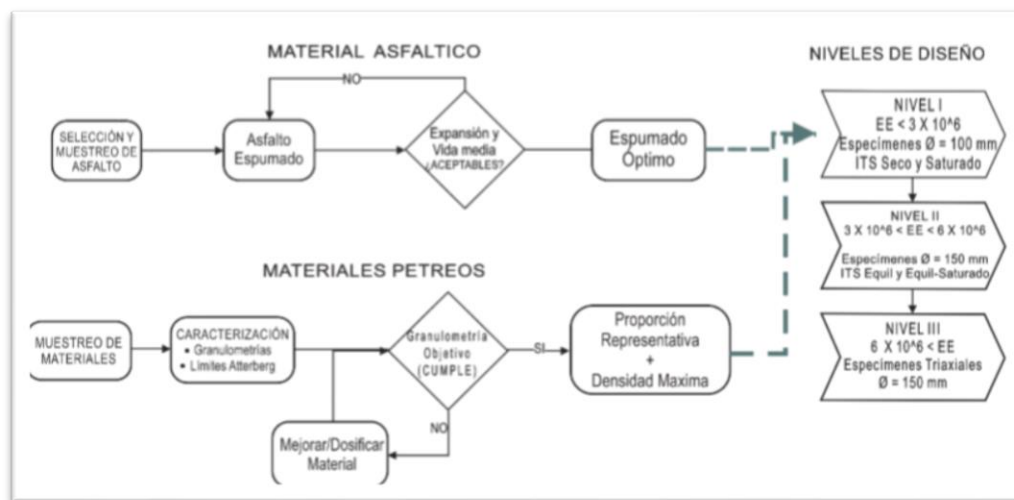


Ilustración 21 Diagrama para el desarrollo del diseño para una base estabilizada con asfalto espumado.
 Fuente X Congreso Mexicano del Asfalto, Fidel García Hernández, Domingo Eduardo Campos Hernández y Horacio Delgado Alamilla .

4.1.1 Etapa 1. Caracterización de los materiales

La caracterización de los materiales comprende al material pétreo recuperado de la base, el material reciclado de la carpeta RAP y el material asfáltico. A estos materiales se les realiza la prueba de los límites de plasticidad de los materiales determinado con base en la Norma M-MMP-1-07/07 *Límites de consistencia*. La plasticidad de los materiales tiene como objetivo, mediante el valor del índice plástico, (ver ilustración 22), indicar si el material pétreo tendrá un pretratamiento, como vemos en la tabla 2.

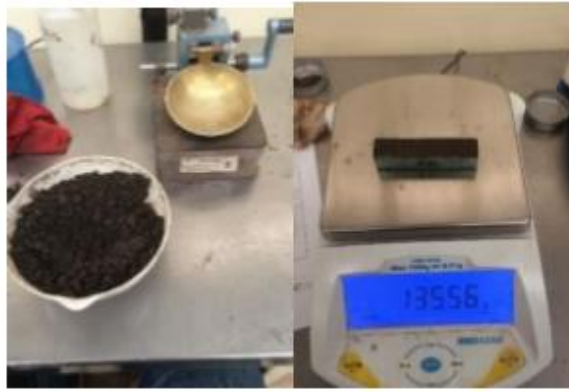


Ilustración 22 Prueba de los límites de consistencia, cabe mencionar que esta prueba solo se le hace al material pétreo.

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

Tabla 2 Determinación del pretratamiento del filler. Fuente Diseño de una base estabilizada con asfalto espumado AMAAC.

Además, al ensayo de plasticidad, también se realiza la granulometría mediante la Norma ASTM C136 *Análisis Granulométrico del material pétreo Finos y Gruesos*. Este ensayo es realizado tanto al material pétreo como al material de RAP.

El material asfáltico puede ser clasificado tanto por viscosidad como por Grado PG. Para el caso particular del diseño utilizaremos PG. Es importante como ya lo habíamos mencionado anteriormente que no se debe utilizar asfaltos modificados para la producción de asfalto espumado.

4.1.2 Etapa 2: Determinación de la granulometría de diseño y compactación

↳ Granulometría de diseño

Para la prueba de granulometría se realiza una homogenización del material, la reducción de las muestras conforme a la prueba ASTM C702/C702M-11 *Práctica normativa para reducir las muestras de agregados a tamaño de prueba*. Este ensayo se realiza tanto al material pétreo como al material de RAP.

Uno de los puntos fundamentales en el diseño de la base estabilizada con asfalto espumado es el ajuste de la estructura granulométrica de mezcla de los materiales. La muestra de los límites granulométricos requeridos para las bases estabilizadas con asfalto espumado, denotados en línea roja (ilustración 23). Este criterio, regularmente, define el porcentaje máximo de RAP a utilizar en la mezcla de materiales. La Tabla 3 presenta los límites granulométricos para abertura de malla.

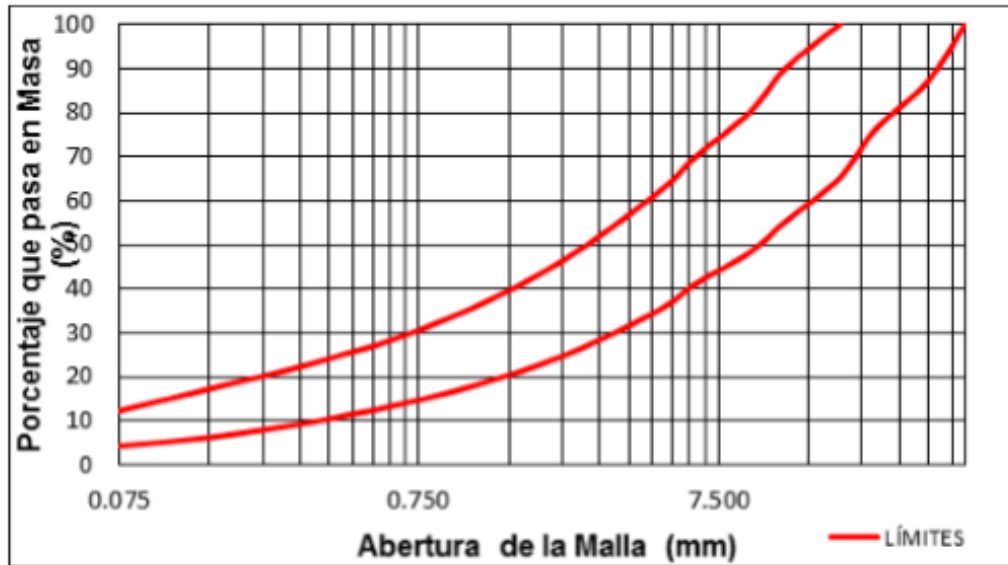


Ilustración 23 Gráfica límites granulométricos para bases espumadas.

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

Tabla 3 Límites de abertura de malla, para el diseño de la granulometría.

Debido a que la granulometría que se obtiene con el fresado generalmente no cumple con la especificación, regularmente siempre se tiene que utilizar material pétreo de aporte.

La metodología de diseño para asfalto espumado dice que, sin importar el nivel del tránsito, no se deben utilizar partículas mayores a 3/4 in, mismas que deben retirarse y compensarse con el material restante, con lo que se genera una proporción representativa del material.

📌 Densidad Máxima

Se determina el Peso Volumétrico Seco Máximo PVSM, γ_d , una vez ya tenida la granulometría definida, llevándose el ensayo de acuerdo la norma M-MMP-1-09/06, variante "D" (ilustración 24). Con la prueba se obtendrá dos parámetros de diseño los cuales son el contenido de humedad óptima y la densidad seca máxima.

La compactación se realiza en cinco (5) capas, aplicando cincuenta y seis (56) golpes por capa, con un pisón de 4.54 kg en un molde de 152.4 mm de diámetro interior.

Cabe decir que cada una de las mezclas se requiere realizar cuatro puntos con diferentes contenidos de humedad, para obtener dos puntos antes y dos después, del contenido de humedad óptima.



Ilustración 24 Molde utilizado para la variante "D".

✎ Proporción representativa

Esta etapa es la elaboración de la proporción representativa, recordando que toda partícula mayor a 3/4 in, se retiran automáticamente y se reemplazan.

Para formar la proporción representativa se necesita separar el material de la siguiente forma:

- Cantidad retenida en la malla 19 mm
- Cantidad que pasa la malla 19 mm y es retenida 12.5 mm
- Cantidad que pasa la malla 12.5 mm y es retenida 4.75 mm
- Cantidad que pasa la malla 4.75 mm
- El material retenido en la malla 19 mm es sustituido por el material que pasa la malla 19 mm y es retenido en malla 12.5 mm, siguiendo un procedimiento con una pequeña formula.

4.1.3 Etapa 3: Determinación de las propiedades espumantes del asfalto

La razón sobre determinar los parámetros espumantes es para obtener el porcentaje de agua, así como la temperatura óptima del asfalto que se requiere para producir las mejores propiedades espumantes de un asfalto, esto para tener una mayor área de contacto y un mejor revestimiento de los agregados a estabilizar.

Las propiedades espumantes para cada tipo de asfalto se determinan mediante dos parámetros: Relación de expansión y vida media. Esta determinación se realiza en el equipo de espumado de laboratorio WLB-10S, de una manera simple (ilustración 18).

Para determinar las propiedades espumantes del asfalto Re y $\tau_{1/2}$ se utiliza una varilla estandarizada y un recipiente precalentado a 75 °C, dentro del cual se procede a descargar el asfalto espumado (ilustración 25).



Ilustración 25 Recipiente llamado vasije y varilla estandarizada para medir la expansión del asfalto espumado.

Después, se analiza el volumen expandido y su consecuente colapso dentro del recipiente conforme transcurre el tiempo.

Entre el tiempo $t=0$ y $t=1$ se puede apreciar la descarga del asfalto. Para el tiempo $t=2$ el asfalto espumado comienza a colapsar, y es hasta el tiempo $t=3$ cuando el volumen máximo se encuentra a la mitad, momento de registrar el tiempo. Es posible conocer la vida media $\tau_{1/2}$; posteriormente, en el tiempo $t=4$, el volumen final de asfalto espumado ha colapsado por completo (ver ilustración 26).

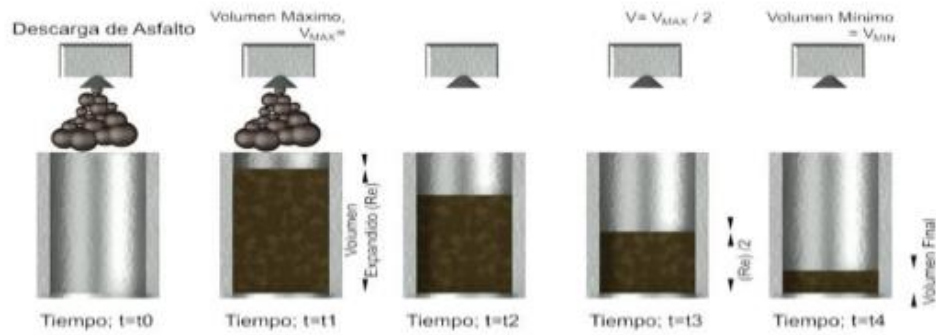


Ilustración 26 Colapso del asfalto espumado después de realizar la descarga.

➤ **Relación de Expansión (Re)**

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

➤ **Vida Media ($\tau_{1/2}$)**

Es una medida de la estabilidad del asfalto espumado, calculado como el tiempo, en segundos, que tarda la espuma en colapsar a la mitad de su volumen máximo. La metodología consiste en analizar el volumen máximo del asfalto espumado mediante una varilla y una cubeta de medición diseñada especialmente para dicho propósito, a la par se registra el tiempo en el cual el volumen máximo expandido ha colapsado. El esquema de medición de estos dos parámetros se presenta en la ilustración 26.

El criterio para determinar el espumado óptimo está en la relación de expansión Re, con una mejor vida media $\tau_{1/2}$, donde los límites de aceptación se encuentran establecidos en el Manual Wirtgen Cold Recycling Technology, y que corresponden a los que se muestran en la Tabla 4

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

Tabla 4 Límites para el asfalto espumado. Fuente Wirtgen 2012

Entonces para determinar el espumado óptimo, se procede a realizar diferentes barridos de temperaturas a 160° C, 170 °C y 180 °C y contenidos de agua 2, 3 y 4%, para obtener los valores de Re y $\tau_{1/2}$.

La ilustración 27 muestra la forma en cómo se determina el porcentaje de agua óptimo para obtener las mejores propiedades de espumado del asfalto utilizando una temperatura de 170°C, como ejemplo. En la grafica se puede ver como se interceptan las dos rectas, dándonos el punto de referencia, del porcentaje de agua optima.

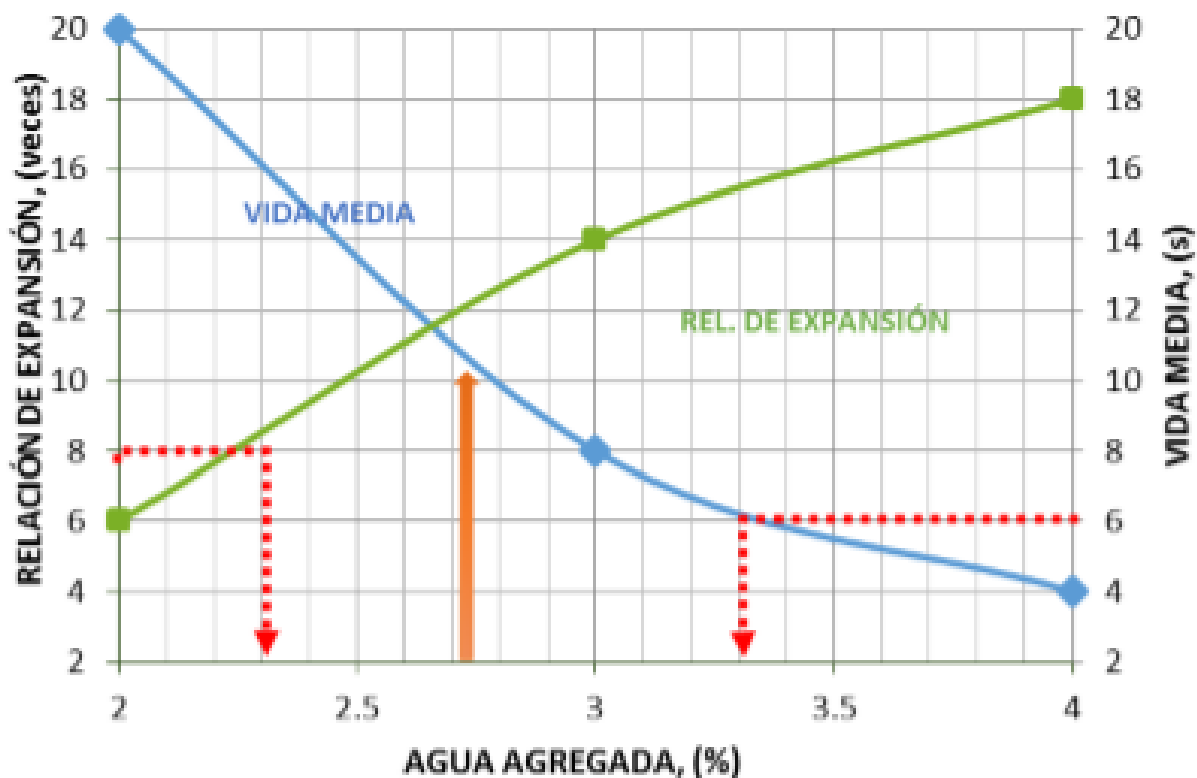


Ilustración 27 Gráfica para obtención del porcentaje de agua óptimo para el espumado.

A modo de ejemplo la tabla 5, presenta los límites de aceptación y los valores obtenidos para tres temperaturas distintas. Al igual se observa que a la temperatura de 170°C el asfalto adquiere sus mejores propiedades de espumado con un contenido de agua de 2.7%, al estar por arriba de los límites mínimos de vida media y/o expansión.

Características del asfalto espumado (Valores mínimos)		Temperatura (°C)	% de agua (%)	Vida Media (s)	Re (Veces)
Temperatura del agregado	> 15 °C	160	2.7	8.5	9.8
Re (veces)	8	170	2.7	10.5	12.2
$\tau_{1/2}$ (s)	6	180	2.75	8.5	9.5

Tabla 5 Límites mínimos de asfalto espumado y valores obtenidos. Fuente AMMAC.

4.1.4 Etapa 4: Diseño de la mezcla de materiales

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

📌 Nivel I: Necesidad de filler activo

El nivel I de diseño, tiene como objetivo establecer si la mezcla de materiales (Base hidráulica - RAP) necesita la inclusión de un filler activo. Para esta determinación se realizará un ensayo de susceptibilidad a la humedad mediante el ensayo de TSR (Tensile Strength Ratio por sus siglas en inglés).

En este nivel ocupamos 6 especímenes de 100 mm de diámetro y 63.5 mm de altura (para sin filler, con cal o con cemento), introduciéndolos en un horno durante 72 hrs a una temperatura de 40°C para posteriormente ensayar 3 especímenes en estado seco a una temperatura de 25 ± 2°C, los otros 3 especímenes son saturados durante 24 hrs a 25°C y seguidamente se secan superficialmente y se ensayan a una temperatura de 25 ± 2°C.

Los dos fillers activos utilizados para este tipo de material es la cal y el cemento Portland en porcentajes de 1%. Por lo cual, se realiza una evaluación con cada una de las tres variables Sin filler, 1% de cal y 1% de cemento.

Recordando que si el índice plástico, nos arrojaba un valor menor al 10, (tabla 2), se requeriría agregar filler activo.

Para la elaboración de especímenes es necesario de una mezcladora Wirtgen WLM30, donde se mezclan uniformemente durante un minuto, el material a estabilizar. Posteriormente, se enciende de nuevo el equipo añadiendo simultáneamente el agua hasta el 75% de humedad óptima. Una vez añadida el agua al 75% hasta alcanzar su contenido óptimo, se prende por última vez la mezcladora para poder así inyectar la espuma requerida para la cantidad de material, y al final añadir el 25% de agua restante, siendo el agua un elemento necesario durante el mezclado para una adecuada dispersión en el agregado.

Para compactar el material se utiliza la compactación manual o la compactación Marshall; pero sin embargo también se pueden utilizar, compactador giratorio, martillo o mesa vibratorios, siempre y cuando todos alcancen el 100% de compactación.

Una vez compactadas los especímenes y acondicionados, se procede a ensayarlos para obtener el valor de ITS, (ilustración 28) tanto como seco y saturado, comparándolos con la tabla 6, para determinar su aceptación. Por otro lado, también al obtener el $TSR > 60\%$ la mezcla no llevará filler; pero sin embargo, si el $TSR < 60\%$ si se le agrega filler, escogiendo entre los dos, aquel que logre una diferencia mayor al 5%, y en dado caso que sea menor, cualquiera de los dos filler propuestos servirá.



Ilustración 28 Equipo Indirect Tensile Strength que se utiliza para conocer el esfuerzo máximo admisible antes de producirse una grieta o falla en los asfaltos espumados.

Prueba	Diámetro de espécimen	kPa
ITSseco	100 mm	>225
ITSSaturado	100 mm	>100

Tabla 6 Características mínimas de aceptación para el nivel I. Wirtgen 2012.

Para el cálculo del ITS tenemos:

$$ITS = \frac{2P}{\pi hd}$$

Donde:

ITS = resistencia a la tracción indirecta [kPa]

P = carga máxima aplicada [kN]

h = altura promedio del espécimen

d = diámetro del espécimen

Para el cálculo de TSR:

$$TSR = \frac{\text{Prom ITSSaturado}}{\text{Prom ITSseco}} * 100$$

Prom ITSSaturado = valores ITS saturado promedio [kPa]

Prom ITSseco = valores ITS seco promedio [kPa]

✎ Nivel II: Determinación del contenido de asfalto espumado

En este nivel, se pretende determinar el contenido óptimo de asfalto espumado que requiere el material. Una vez seleccionada una de las tres variantes analizadas en el Nivel I, se realiza un barrido de contenidos de asfalto espumado, determinando el mejor desempeño mediante el ensayo de susceptibilidad a la humedad.

Los rangos de contenido de asfalto espumado varían de acuerdo con los materiales, porcentaje de RAP y las características de compactación. Los especímenes son de 150 mm de diámetro y 95 mm de altura, acondicionándose nuevamente 6 especímenes introduciéndolos en un horno en una primera etapa a 24 hrs a una temperatura de 40°C y posteriormente en una segunda etapa se introducen 48hrs en bolsas de plástico a la misma temperatura con la finalidad de guardar la humedad de equilibrio (50% de su humedad óptima) que es la que representa las condiciones de campo, al finalizar ambas etapas se ensayan 3 especímenes en estado de humedad de equilibrio a una temperatura de 25 ±

2°C, y los otros 3 especímenes son saturados durante 24 hrs a 25°C y seguidamente se secan superficialmente y se ensayan inmediatamente para conservar la temperatura de 25 ± 2°C.

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

La selección óptima de asfalto espumado que varía de 2 a 3% regularmente, (para su análisis se va incrementando 0.2%), al igual que el anterior nivel I, se obtiene un ITSequilibrio y una ITSequisaturado, donde los criterios de aceptación se describen en la tabla 7, llevando consigo completar este nivel de diseño.

Prueba	Diámetro de espécimen	kPa
ITSequilibrio	150 mm	>175
ITSequisaturado	150 mm	<100

Tabla 7 Parámetros mínimos de diseño nivel II.

📌 Nivel III: Propiedades mecánicas

EL Nivel I tiene como objetivo evaluar las propiedades mecánicas de la mezcla de materiales definida en los dos niveles previos. Los parámetros que evaluar son el valor de cohesión y el ángulo de fricción interna, los cuales serán determinados mediante un ensayo de triaxial. Para esta evaluación se fabrica 8 especímenes de prueba para la realización del ensayo triaxial. Se utilizan cuatro condiciones de confinamiento (0 kPa, 50 kPa, 100 kPa y 200 kPa). Aquí los especímenes son de diámetro=150mm y h=300 mm se acondicionan los 8 especímenes introduciéndolos en un horno en una primera etapa a 24 hrs a una temperatura de 40°C y posteriormente en una segunda etapa se introducen 48hrs en bolsas de plástico a la misma temperatura con la finalidad de guardar la humedad de equilibrio (50% de su humedad óptima) que es la que representa las condiciones de campo, al finalizar ambas etapas se ensayan todos los especímenes en el estado de humedad de equilibrio a una temperatura de 25 ± 2°C.

Es importante mencionar que los especímenes en los tres niveles se fabrican tomando como referencia la densidad seca máxima y la humedad óptima del material. La determinación de los valores de cohesión (C), del ángulo de fricción (ϕ) se hace mediante el Círculo de Mohr- Coulomb, y sus parámetros de diseño para el nivel III, se describen en la tabla 8.

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

Tabla 8 Parámetros mínimos de diseño para nivel III.

La cohesión retenida (C_{Ret}) tiene como objetivo de probar la confiabilidad en la obtención de los parámetros antes mencionados, esta cohesión retenida se determina de la misma forma que en las probetas anteriores, pero en condición saturada y para un confinamiento de 100 kPa. Un valor mínimo del 75% de cohesión retenida en una prueba triaxial es aceptable para establecer que los resultados son confiables. La cohesión retenida se calcula como sigue:

$$C_{Ret.} = \frac{(\sigma_{1\ sat-100})}{(\sigma_{1\ equil-100})} * 100$$

PARÁMETRO	UNIDAD	VALORES DE ACEPTACIÓN MÍNIMOS
PVSM	Kg/cm ³	----
HUMEDAD ÓPTIMA	%	----
TEMPERATURA PARA ESPUMADO	°C	----
AGUA ÓPTIMA PARA ESPUMADO	%	----
Relación de expansión	Veces	8
Vida media	s	6
Combinación de materiales	%	----
Susceptibilidad Humedad (NIVEL I)	%	60
TSR Seco	kPa	>225
TSR Saturado	kPa	>100
FILLER ACTIVO		----
Susceptibilidad Humedad (NIVEL II)	%	60
TSR Seco	kPa	175
TSR Saturado	kPa	100
ASFALTO ESPUMADO	%	----
COHESIÓN (NIVEL III)	kPa	250
ÁNGULO DE FRICCIÓN (NIVEL III)	°	40
COHESIÓN RETENIDA (NIVEL III)	%	75

Tabla 9 Valores de aceptación para los parámetros de diseño, desde todas sus etapas. Fuente X Congreso Mexicano del Asfalto, Fidel García Hernández, Domingo Eduardo Campos Hernández y Horacio Delgado Alamilla que se derivan de la Wirtgen Cold Recycling Technology del Grupo Wirtgen.

4.2 Construcción de la base estabilizada con asfalto espumado

Respecto a la construcción de una base estabilizada con asfalto se consideran los siguientes puntos, mismo que describiremos a continuación, sin embargo, el ejemplo que utilizaremos es para realizarse con una planta estacionaria Wirtgen KMA 220.

4.2.1 Fresado de carpeta existente

Con la ayuda de una máquina fresadora de pavimentos se retiran las capas del pavimento que no van a formar parte de la estabilización. De conformidad con lo especificado en cada proyecto, el equipo fresador debe estar equipado con un sistema de nivelación de sensores que aseguren las profundidades de corte.

La profundidad estará determinada, de conformidad con los resultados del diseño del asfalto espumado en laboratorio. Recomienda que la fresadora sea Wirtgen o técnicamente que cuente con el control de revoluciones del tambor.



Ilustración 29 Fresado de los materiales.

4.2.2 Almacenamiento del material

El material recuperado deberá transportarse a planta y almacenarse para su posterior estabilización. Es recomendado que estén separado el material fresado como se muestra en la ilustración.



Ilustración 30 Almacenamiento del material fresado.

4.2.3 Detección de baches

Retiradas las capas, se pasará un compactador neumático autopropulsado tipo Hamm GRW280 o técnicamente similar de al menos 16 toneladas, sobre todo en el ancho de la corona, para detectar zonas inestables de la superficie actual y en caso de encontrarlas, se hará un bacheo de caja para eliminar el material alterado, hasta una profundidad de cincuenta (50) centímetros, en promedio.

La excavación deberá ser de forma rectangular, con sus lados alineados longitudinal y transversalmente a la carretera, y cuidando de no afectar el material más allá de los límites de la excavación. Si dicha superficie presenta exceso de humedad, se deberá excavar hasta que desaparezca o formar una plantilla para proporcionarle compactación utilizando material con una calidad que proporcione un soporte adecuado para las capas superiores del pavimento. ⁵



Ilustración 31 Una vez que se freso la carpeta y la base, se hace circular un compactador neumático con el objetivo de detectar hundimientos en la estructura.

4.2.4 Estabilización de la base con asfalto espumado

1. Para la estabilización de la base espumada se utilizará una recicladora en frío Wirtgen WR 4200, la cual recomienda, tener la capacidad de reciclar capas de pavimento de gran espesor en una pasada; ser autopropulsada, y debe disponer de tambores de fresado de accionamiento hidráulico, una mezcladora de circulación forzada de dos árboles, una instalación de ligante de mando electrónico y una unidad de tendido de alta potencia.

⁵ Diseño de bases estabilizadas con asfalto espumado IMT, 2018.



Ilustración 32 Elaboración del asfalto espumado.

2. Respecto, a la estabilización de los materiales en la planta, se describe el proceso en que ésta se llevará a cabo a continuación:
 - Mezcla de los materiales: se efectuará en las proporciones definidas por el diseño particular de mezcla del proyecto vírgenes, recuperados o de aporte usando una planta de reciclaje en frío tipo Wirtgen KMA 220 o técnicamente equivalente, que conste de dos tolvas para la alimentación del material, con mallas de protección para el ingreso de sobre tamaños y un sistema de banda; además de una tolva y un sistema de alimentación de filler (cal o cemento) controlado por peso.
 - Inyección de agua: La cantidad de agua agregada a la mezcla deberá ser la necesaria para llegar al 65-80% del contenido de humedad obtenida de la prueba, alcanzándose la humedad óptima del material a reciclar. El agua se suministrará a través de una instalación adicional con tobera por separado. Deberá contarse, además, con una bomba excéntrica para absorber el agua directamente del camión cisterna o del depósito de agua de la máquina. La capacidad máxima de transporte de la bomba helicoidal excéntrica será de 400 l/min.
 - Inyección de asfalto espumado: La inyección de asfalto espumado deberá asegurar la expansión volumétrica y vida media del asfalto mediante la inyección de agua, aire y asfalto a una cámara de expansión de asfalto espumado con los parámetros definidos por el laboratorio.
 - Proceso de espumado: Se llevará en las cámaras de expansión de la barra de inyección. La capacidad máxima de transporte de la bomba de engranajes para

asfalto, calentada de forma eléctrica, será de 500 kg/min. Contará con 8 toberas de barra de inyección de asfalto caliente las cuales se abrirán y cerrarán automáticamente mediante cilindros neumáticos.

- Sistema de control en tiempo real: Debe garantizar de forma automatizada la dosificación de todos los elementos de la mezcla en los porcentajes establecidos por el proyecto.
- Transporte: La mezcla el material puede transportarse en camiones directamente a sitio para su pavimentación o almacenarse en pilas para su uso posterior, en cuyo caso se deberá incorporar la humedad perdida durante su almacenamiento antes de pavimentarse.

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

- Tendido: La mezcla deberá tenderse con una pavimentadora que cuente con una regla de precompactación, así como con dispositivos para ajustar el espesor y el ancho de la mezcla tendida. Deberá contarse, asimismo, con un sistema que permita la repartición uniforme de la mezcla sin que se presente segregación por tamaños. Finalmente se compactará al grado requerido por el proyecto.

3. La compactación primaria se realizará seguidamente del extendido, para lo cual se utilizará un compactador de por lo menos 12 toneladas de peso con compactación dinámica en amplitud alta y frecuencia baja.



Ilustración 33 Proceso de compactación de la base estabilizada.

4. La compactación secundaria se deberá realizar utilizando un compactador de rodillo liso con amplitud baja y frecuencia alta.

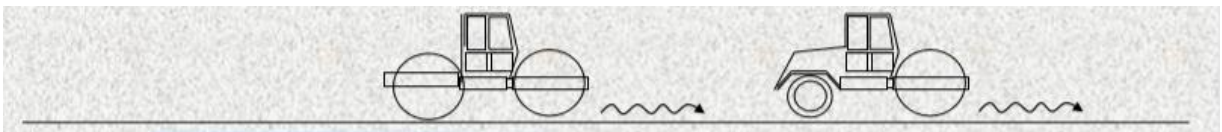


Ilustración 34 Compactación secundaria.

5. Durante la compactación neumática, se rociará agua en la corona de la base y se hará circular un compactador neumático hasta cerrar los poros en la superficie. El laboratorio a cargo definirá el número de pasadas.



Ilustración 35 Compactación neumática.

6. Tiempo para la colocación de la carpeta: se deberá esperar hasta que el material extendido llegue al 50% de su contenido óptimo de humedad, antes de extender la carpeta asfáltica.

Los ensayos que realizar para la ejecución del tramo de prueba se dividen en tres partes: ensayos previos al diseño, ensayos durante la ejecución y control de calidad después de la compactación, sin embargo, para los alcances de este trabajo no se describirán.

Capítulo 5

Ventajas del uso del
asfalto espumado y experiencias en algunos
países del mundo

Introducción

A pesar de ser, tecnología poco usada en México, ampliamente si, se usa en el resto de mundo. En el viejo continente, en Noruega, Gran Bretaña y en los Países Bajos, de igual manera en países de Europa Oriental, como lo es Rusia o las Repúblicas Bálticas, en el reciclaje en frío se impone cada vez más el empleo de asfalto espumado como alternativa de los agentes estabilizadores o ligantes clásicos.

Un importante número de proyectos en América del Norte y en Sudamérica se están ejecutando. En países como Arabia Saudita, Irán, Libia o algunos estados africanos (Malawi, Nigeria o Sudáfrica), con extremas condiciones climatológicas, la tecnología del asfalto espumado se ha utilizado eficientemente y se han obtenido buenos resultados.

En estados de la unión americana como; Connecticut, Florida, Indiana, Iowa, New México South Dakota, Texas y Wyoming, se utiliza el asfalto espumado (ilustración 36).



Ilustración 36 Estados de la unión americana donde se está empleando el asfalto espumado. Fuente Properties of Foamed Asphalt.

5.1 Ventajas del asfalto espumado

Tales como el cemento o la emulsión asfáltica, en la rehabilitación de carreteras, empleando asfalto espumado en el reciclaje en frío, resultan las siguientes ventajas:

- Para la producción de asfalto espumado, se puede utilizar asfalto usual que produce PEMEX, sin embargo, no debe utilizar asfaltos modificados. De este modo se asegura un alto grado de disponibilidad.
- La producción de asfalto espumado se le agrega pequeñas cantidades de asfalto y agua respecto a otras mezclas, traduciéndose en una forma de reducción de los gastos de transporte y de material.
- La mezcla en frío es apta para el tráfico después de la colocación y de la compactación, ayudando a reducir a un mínimo el entorpecimiento del tráfico.
- Ya que, es posible dosificar selectivamente la cantidad de agua añadida, al emplear asfalto espumado como estabilizador, las variaciones de la humedad intrínseca de los aglomerados son de menor importancia.
- No es necesario considerar ni tiempos de ruptura, ni tiempos de fraguado, al emplear asfalto espumado.
- El asfalto espumado es un ligante económico, ya que son pequeñas las cantidades que se proporcionan.
- La producción de asfalto espumado se efectúa de manera rápida y sencilla directamente en la recicladora o en la mezcladora. No se requieren equipos adicionales.
- La mezcla en frío, producida empleando asfalto espumado como ligante, dispone de excelentes propiedades para el almacenamiento.

5.2 Experiencias en algunos países del mundo

Como ya lo habíamos mencionado anteriormente, las aplicaciones del asfalto espumado en el mundo son algunas, con casos de éxito, sin embargo, en México son muy pocas y para este tiempo solo hay una obra en usando esta mezcla en frío. A continuación, mencionamos algunos ejemplos de aplicaciones alrededor del mundo.

5.2.1 Arabia Saudita una carretera en el desierto para el tráfico de gran tonelaje

En un trayecto de más de 380 km de longitud, la carretera de dos carriles Shaybah Access Road une la ruta principal de Batha y el área Saudi Aramco Shaybah en el desierto de Rub al Khali.

A fin de poner en explotación un campo petrolífero, incluyendo una refinería y debido al tráfico de gran tonelaje a esperar en relación con el transporte de piezas de las plantas de procesamiento, con un peso que puede ascender hasta 200 t, resultó imprescindible la construcción de una vía fiable de tráfico.

Originalmente, la Shaybah Access Road había sido construida sólo como carretera no ligada de roca yesosa del triásico superior, por lo que fue posible sanearla en todo su largo en tan sólo 180 días, empleando la tecnología de asfalto espumado.

Para ello, durante la etapa principal de construcción, se utilizaron 3 recicladoras en frío WR 2500 de Wirtgen, así como mezcladoras de suspensión móviles WM 400. Añadiendo un 5% de asfalto espumado y un 2% de cemento como suspensión, fue posible fresar un promedio diario de aprox. 35,000 m² de carretera existente y procesarlo con los ligantes. La profundidad de trabajo fue de 20 cm (ilustración 37).

A fin de obtener propiedades óptimas de elaboración y compactación del subsuelo de roca yesosa del triásico superior y arena, se añadió aproximadamente un 4% de agua. Además de las máquinas WR 2500 y WM 400 de Wirtgen, se emplearon motoconformadoras para corregir el perfil, así como también compactadores vibratorios y compactadores de neumáticos para compactar el aglomerado.

A fin de alcanzar un desarrollo óptimo del trabajo y de obtener la mejor calidad de ejecución posible, dos trenes de reciclaje, uno inmediatamente detrás del otro, trabajaron dedicados a la rehabilitación de uno de los dos carriles de la carretera.

De esta manera fue posible garantizar la obtención de una buena adherencia de las vías de trabajo entre sí y la corrección óptima del perfil de la carretera completa. Así, durante el tiempo completo de construcción, fue posible que los camiones de gran tonelaje transitaran por el mismo cuerpo de la carretera

Para finalizar, sobre la capa de base saneada se aplicó un tratamiento asfáltico de la superficie.

En un protocolo de inspección, los expertos en la construcción de carreteras elogiaron la excelente idoneidad del asfalto espumado como ligante, incluso bajo estas condiciones climáticas extremas, así como la elevada rentabilidad.

Los métodos de construcción convencionales con mezclas en caliente, que se habían previsto originalmente, fueron rechazados, ya que con ellos no hubiese sido posible cumplir ni con las condiciones económicas, ni con el cronograma del proyecto.



Ilustración 37 En funcionamiento continuo las 24 horas del día, incluso bajo condiciones climáticas extremas: uno de los tres trenes de reciclaje de Wirtgen, compuesto de la máquina WR 2500 y de la mezcladora de suspensión WM 400, durante la rehabilitación económica.

5.2.2 Saneamiento de las vías a lo largo de la red de canales en el distrito Los Baños en Estados Unidos de América.

El mantenimiento de las vías a lo largo de la red de canal es de la incumbencia de la San Luis & Delta-Mendota Water Authority en California. Además de los vehículos de inspección de la autoridad, estas carreteras las emplean también los campesinos de las regiones circunvecinas. Durante épocas de cosecha, circulan vehículos de elevada carga por estos caminos.

Las vías, cuya infraestructura en un principio únicamente consistía en material arcilloso de excavación procedente del canal, presentaban un fuerte agrietamiento en la capa de rodadura de asfalto. Sucesivamente, la penetración de agua produjo daños mayores y erosión por lavaje.

La autoridad decidió aplicar la tecnología del asfalto espumado de Wirtgen, empleando la recicladora WR 2500, a fin de rehabilitar la red vial dañada.

Durante el primer paso, se granuló el camino existente en el ancho completo de aprox. 4.3 m, antes de que una motoconformadora, así como una compactadora efectuaran una primera corrección del perfil y la precompactación de la infraestructura homogeneizada.

Durante el segundo paso, se llevó a cabo la incorporación de una combinación de ligantes compuesta de 1.5% de cemento y de un 3% de asfalto espumado, mediante un tren de pavimentación, el cual, además de la recicladora WR 2500 de Wirtgen, también comprendía un carrotanque de agua, así como un carrotanque de asfalto.

Después de la compactación final de la red vial mediante compactadores vibratorios y compactadores de neumáticos, se aplicó un tratamiento de superficie para el sellado. También en este caso, el saneamiento de las vías a lo largo de la red de canales resultó ser un método de rehabilitación rápido y eficaz, en el cual no fue necesario emplear material de otra procedencia (ilustración 38).



Ilustración 38 En funcionamiento continuo las 24 horas del día, incluso bajo condiciones climáticas extremas: uno de los tres trenes de reciclaje de Wirtgen, compuesto de la máquina WR 2500 y de la mezcladora de suspensión WM 400, durante la rehabilitación económica.

5.2.3 Máximo rendimiento gracias al empleo de asfalto espumado en un proyecto de saneamiento en Noruega

Temperaturas muy bajas en invierno y ciclos frecuentes de hielo y deshielo, exigen requerimientos especiales de las estructuras de carreteras en Noruega.

Se requieren métodos económicos de rehabilitación, en especial para el saneamiento de vías de tráfico mediante el rentable reciclaje en frío, a fin de poder mantener la red de carreteras en un estado utilizable.

Así, por ejemplo, la empresa Veidekke, que tiene una larga experiencia en la aplicación de diferentes métodos de reciclaje en frío, en medio año saneó más de 800,000 m² con la máquina WR 2500, empleando asfalto espumado como ligante. A fin de compensar fuertes

desniveles y para estabilizar las capas existentes, es posible esparcir previamente material fresado o una mezcla nueva de minerales. La recicladora WR 2500, al fresar la estructura de carretera existente, lo que, comúnmente se efectúa a una profundidad de cerca de 20 cm, va incorporando estos materiales (ilustración 39).

Teniendo en cuenta la flexibilidad que requieren las estructuras de carretera debido a las bajas temperaturas durante el invierno, en el proceso de tratamiento se utilizan tipos de asfalto blando. El sistema de regulación por microprocesador de la máquina WR 2500 controla el proceso de espumado y la dosificación de las cantidades añadidas de ligante.

La recicladora suministrada por la empresa Veidekke fue equipada especialmente con un sistema adicional de dosificación de aditivos para el asfalto caliente, con la finalidad de mejorar las propiedades de adhesividad del ligante.

Si se añade un promedio de 3.5% del peso del asfalto, el consumo de asfalto caliente al día asciende a 100 t, lo que corresponde a un rendimiento de la máquina WR 2500 de aproximadamente 10,000 m² por jornada, o bien a la rehabilitación en toda su anchura de un tramo de carretera de 1.5 km de longitud.

Los trabajos se efectúan sin cortar el tráfico. Después de corregir los perfiles con una motoniveladora y de compactar las capas recicladas, se efectúa la apertura al tráfico. Dependiendo del tráfico, se extienden, posteriormente, una o dos capas adicionales de asfalto.



Ilustración 39 Una prueba del rendimiento de la máquina WR 2500: en esta obra en Noruega, el abastecimiento de ligante de este carrotanque fue suficiente para reciclar 2,500 m² en poco menos de 2 horas. Fuente Betún Espumado de Wirtgen.

Conclusiones

Las mezclas con asfalto espumado en México se pueden volver en una alternativa para la estabilización de capas estructurales en los pavimentos, debido principalmente a su buen comportamiento, facilidad de construcción, compatibilidad con un amplio rango de tipos de agregados y ventajas energéticas. Sin embargo, como toda nueva tecnología aún quedan aspectos por investigar y acumular experiencia, elementos que actualmente no se encuentran en México.

Los criterios de relación de expansión y vida media son términos reconocidos como los más importantes en el proceso de producción de la espuma, sin embargo, la forma en que son medidos y analizados no permite la obtención de valores precisos, sino más bien órdenes de magnitud. Por esta razón se propone investigar nuevas formas para medir estas propiedades y de este modo obtener una caracterización más precisa de la espuma y su habilidad para mezclarse con los agregados.

El reto inicial en el diseño de la base estabilizada con asfalto espumado es definir una granulometría, debido a que, el material recuperado del pavimento (RAP) en general no cumple con los requerimientos establecidos en la metodología y es necesario agregar material granular de aporte, sin embargo, alrededor del 50% del material RAP es reutilizado lo que representa que no sea ha podido llegar al 100%.

La maquinaria para el diseño está solo desarrollada por una sola empresa denominada Wirtgen, que pudiera traducirse en una desventaja, ya que no hay mercado que compita con ella ofreciendo mayores alternativas al momento de escoger por los constructores. El manual de diseño de Wirtgen, es de difícil acceso para los ingenieros.

Uno de los inconvenientes de la realización del diseño de la base estabilizada con asfalto espumado es que no se ha establecido un procedimiento de diseño en laboratorio y que la normatividad mexicana no contempla el uso de otras técnicas de estabilización con asfalto como puede ser la tecnología denominada Asfalto Espumado, ni tampoco contempla una metodología para la utilización de materiales recuperados (RAP).

No se pueden utilizar asfaltos modificados para la fabricación del asfalto espumado, sin embargo, el asfalto que produce PEMEX puede utilizarse, conforme al método de diseño

Es posible afirmar que una base estabilizada con asfalto espumado tiene un mejor desempeño que una base hidráulica tradicional.

La estabilización con asfalto produce un material con propiedades viscoelásticas, que posee una flexibilidad mejorada y resistencia a la deformación.

El material puede ser transitado inmediatamente después de ser colocado y compactado.

El asfalto espumado requiere que el asfalto esté caliente, generalmente sobre los 160°C. Frecuentemente esto requiere de instalaciones para calentar el mismo, y medidas especiales de seguridad.

Bibliografía

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

- Rajeev Chandraa, A. Veeraragavana and J. Murali Krishnan. (2013). Evaluation of Mix Design Methods for Reclaimed Asphalt Pavement Mixes with Foamed Bitumen. En Evaluation of Mix Design Methods for Reclaimed Asphalt Pavement Mixes with Foamed Bitumen (1-10). Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology Madras, Chennai, India: Procedia - Social and Behavioral Sciences.

- Dr. David Newcomb, TTI Dr. Fan Yin, TTI Dr. Edith Arámbula Mercado, TTI. (2016). Properties and Short-Term Laboratory Conditioning of Foamed Asphalt for WMA Applications. En Properties and Short-Term Laboratory Conditioning of Foamed Asphalt for WMA Applications (1-55). EE.UU.: NCHRP.

- Horacio Delgado Alamilla, Fidel García Hernández y Domingo Eduardo Campos Hernández. (2018). Diseño de bases estabilizadas con asfalto espumado. Sanfandila, Qro.: Instituto Mexicano del Transporte.

- Hosin “David” Lee, Ph.D., P.E. Associate Professor Yong Joo Kim Research Assistant. (2003). Development of a Mix Design Process for Cold-In-Place Rehabilitation using Foamed Asphalt. En Development of a Mix Design Process for Cold-In-Place Rehabilitation Using Foamed Asphalt (1-109). Public Policy Center Civil and Environmental Engineering the University Of Iowa: The University of Iowa.

- Wirtgen Group. (2003). Betún espumado – el ligante innovador para la construcción de carreteras. En Betún espumado – el ligante innovador para la construcción de carreteras (1-32). Widhagen, Alemania: Wirtgen Group.

- Oscar Martínez Hernández. (2014). Comportamiento de las Mezclas Asfálticas a Diferentes Niveles de Compactación. Ciudad de México: UNAM.

- Asphalt Academy. (2009). Bitumen stabilised materials. South África: Construmac.

-
- A Wirtgen Group Company. (2019). Mezcladora móvil de reciclado en frío KMA 220. Wirtgen, 6, 1-40.

 - Ing. Clemente Poon Hung. (2011). Carreteras. En Carreteras SCT (1-58). México: Secretaría de Comunicaciones y Transporte.

 - Fidel García Hernández y Horacio Delgado Alamilla. Domingo Eduardo Campos Hernández. (2017). DISEÑO DE UNA BASE ESTABILIZADA CON ASFALTO ESPUMADO Ejemplo general de diseño. Cancún: Asociación Mexicana del Asfalto A.C.