



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Ingeniería Vial

**RECICLADO EN FRÍO *IN SITU* EN LA REHABILITACIÓN DE PAVIMENTOS
FLEXIBLES CON ASFALTO ESPUMADO Y RECOMENDACIÓN DE
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE CONSTRUCCIÓN PARA GUATEMALA**

Ing. Gustavo Adolfo Cancinos Sazo

Asesorado por el Ma. Ing. César Augusto Castillo Morales

Guatemala, julio de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**RECICLADO EN FRÍO *IN SITU* EN LA REHABILITACIÓN DE PAVIMENTOS
FLEXIBLES CON ASFALTO ESPUMADO Y RECOMENDACIÓN DE
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE CONSTRUCCIÓN PARA GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. GUSTAVO ADOLFO CANCINOS SAZO
ASESORADO POR EL MSC. CÉSAR AUGUSTO CASTILLO MORALES

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN ARTES DE INGENIERÍA VIAL

GUATEMALA, JULIO DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	MSc. Ing. Carlos Arnoldo Morales Rosales
EXAMINADOR	MSc. Ing. Armando Fuentes Roca
EXAMINADORA	Dra. Mayra Virginia Castillo Montes
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**RECICLADO EN FRÍO *IN SITU* EN LA REHABILITACIÓN DE PAVIMENTOS
FLEXIBLES CON ASFALTO ESPUMADO Y RECOMENDACIÓN DE
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE CONSTRUCCIÓN PARA GUATEMALA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Postgrado de la Facultad de Ingeniería, con fecha febrero de 2013.


Ing. Gustavo Adolfo Cancinos Sazo



Guatemala, 02 de Julio de 2013

**Doctora
Mayra Virginia Castillo Montes
Directora
Escuela de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente**


Estimada Doctora Castillo:

Por este medio me dirijo a Usted, con relación al nombramiento recibido el día 12 de febrero de 2013, en la cual me nombra asesor del siguiente trabajo de tesis: "RECICLADO EN FRIO IN SITU EN LA REHABILITACION DE PAVIMENTOS FLEXIBLES CON ASFALTO ESPUMADO Y RECOMENDACIÓN DE ESPECIFICACIONES TECNICAS DE CONSTRUCCIÓN PARA GUATEMALA"; tema a desarrollado por el estudiante Ingeniero Gustavo Adolfo Cancinos Sazo, Número de carné 1000-21089, del programa de Maestría en Ingeniería Vial de la Octava Cohorte.

Por lo anterior y completando el proceso de revisión del trabajo del estudiante Ingeniero Cancinos Sazo, la doy por APROBADA, compartiendo con el autor, los contenidos descritos del mismo.

Sin más que agregar extendiendo la presente,

Atentamente,


Ma. Ing. César Augusto Castillo Morales
ASESOR
Colegiado 3,780

Ing. César A. Castillo M.
Col. 3,780





Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios
De Postgrado
Teléfono 2418-9142

Como Coordinador de la Maestría en Ingeniería Vial, y revisor del trabajo de graduación titulado **“RECICLADO EN FRÍO IN SITU EN LA REHABILITACIÓN DE PAVIMENTOS FLEXIBLES CON ASFALTO ESPUMADO Y RECOMENDACIÓN DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE CONSTRUCCIÓN PARA GUATEMALA.”**, presentado por el Ingeniero Civil **Gustavo Adolfo Cancinos Sazo**, apruebo y recomiendo la autorización del mismo.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”



MSc. Armando Fuentes Roca
Coordinador de Maestría
Escuela de Estudios de Postgrado

Guatemala, julio de 2013.

Cc: archivo
/la



Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios
De Postgrado
Teléfono 2418-9142

Como Revisor de la Maestría en Ingeniería de Vial del trabajo de graduación titulado **RECICLADO EN FRÍO IN SITU EN LA REHABILITACIÓN DE PAVIMENTOS FLEXIBLES CON ASFALTO ESPUMADO Y RECOMENDACIÓN DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE CONSTRUCCIÓN PARA GUATEMALA**. Presentado por el Ingeniero Civil **Gustavo Adolfo Cancinos Sazo**, apruebo el presente y recomiendo la autorización del mismo.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

Dra. Mayra Virginia Castillo Montes
Directora
Escuela de Estudios de Postgrado



Guatemala, julio de 2013.

Cc: archivo
/la



Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios
De Postgrado
Teléfono 2418-9142

La Directora de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen y dar el visto bueno del revisor y la aprobación del área de Lingüística del trabajo de graduación titulado **“RECICLADO EN FRÍO IN SITU EN LA REHABILITACIÓN DE PAVIMENTOS FLEXIBLES CON ASFALTO ESPUMADO Y RECOMENDACIÓN DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE CONSTRUCCIÓN PARA GUATEMALA.”** presentado por el Ingeniero Civil Gustavo Adolfo Cancinos Sazo, apruebo el presente y recomiendo la autorización del mismo.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”


Dra. Mayra Virginia Castillo Montes
Directora



Escuela de Estudios de Postgrado

Guatemala, julio de 2013.

Cc: archivo
/la



Facultad de Ingeniería
Decanato
Teléfono 2418-9142

Ref. APT-2013-002

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Postgrado, al trabajo de graduación de la Maestría en Ingeniería Vial titulado: **“RECICLADO EN FRÍO IN SITU EN LA REHABILITACIÓN DE PAVIMENTOS FLEXIBLES CON ASFALTO ESPUMADO Y RECOMENDACIÓN DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE CONSTRUCCIÓN PARA GUATEMALA”**, presentado por el Ingeniero Civil Gustavo Adolfo Cancinos Sazo, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
DECANO



Guatemala, julio de 2013.

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por darme salud y vida para llegar a este momento trascendental de mi existencia.
La memoria de mis padres	Por el ejemplo de vida que me brindaron. Bendiciones sobre su tumba.
Mi esposa	Con amor y por compartir mi vida, comprensión y apoyo en los momentos difíciles.
Mis hijos	Por ser la razón de mi existencia y superación.
La memoria de mis hermanos	Con amor y recuerdos imperecederos.
Mis hermanos	Amor fraterno y agradecimiento por sus sabios consejos.
Mis familiares	Gracias por la solidaridad en todo momento.
Mis amigos y compañeros	Agradecimientos por su amistad sincera y compartir experiencias y conocimientos.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XIX
OBJETIVOS.....	XXIII
INTRODUCCIÓN	XXIX
1. REHABILITACIÓN DE PAVIMENTOS FLEXIBLES	1
1.1. Estructura de pavimento.....	1
1.1.1. Tipos de pavimentos.....	1
1.1.2. Componentes estructurales del pavimento flexible	2
1.2. Alternativas de mantenimiento y rehabilitación.....	4
1.2.1. Mantenimiento o Conservación	5
1.2.2. La Rehabilitación	5
1.3. Flujo del Proceso de diseño para la rehabilitación de pavimentos con asfalto espumado	9
1.3.1. Obtención de la información disponible	12
1.3.2. Investigaciones Preliminares del pavimento existente	15
1.3.3. Investigación Detallada.....	16
2. LA TECNOLOGÍA DEL ASFALTO ESPUMADO.....	21
2.1. Antecedentes.....	21
2.2. Caracterización del asfalto espumado.....	23

2.2.1.	Razón de Expansión (Ex).....	23
2.2.2.	Vida Media (T1/2).....	23
2.3.	Reciclado de pavimentos	27
2.3.1.	Proceso del reciclado en frío.....	27
2.4.	Aplicaciones del reciclado en frío.....	29
2.4.1.	Reciclado del 100% del RAP (Pavimento Asfáltico Recuperado)	30
2.4.2.	Estabilización con RAP/base granular	30
2.4.3.	Pulverización	31
2.4.4.	Modificación de propiedades mecánicas.....	31
2.5.	Beneficios del reciclado en frío	31
2.5.1.	Ambientales.....	31
2.5.2.	Menor tiempo de construcción	32
2.5.3.	Seguridad al tránsito	32
2.5.4.	Calidad de la obra	32
2.5.5.	Relación Costo/Beneficio	33
2.6.	Tipos de agentes estabilizadores.....	33
2.6.1.	Tipos de estabilizadores.....	34
2.7.	Consideraciones de construcción para trabajar con asfalto espumado	39
2.7.1.	Seguridad.....	39
2.7.2.	Temperatura del agregado.....	39
2.7.3.	Consistencia del suministro y presión de asfalto.....	40
2.8.	Propiedades típicas de los materiales estabilizados con asfalto espumado.....	41
2.8.1.	Resistencia.....	41

3.	DISEÑO DE MEZCLAS Y DISEÑO ESTRUCTURAL DE LA REHABILITACIÓN CON ASFALTO ESPUMADO.....	47
3.1.	Diseño de mezclas	47
3.1.1.	Diseño de mezclas de agregados con asfalto espumado.....	47
3.1.2.	Aparatos de laboratorio utilizados para el diseño de mezclas.....	47
3.2.	Procedimiento para el diseño de mezclas con asfalto espumado.....	51
3.2.1.	Optimización de las propiedades de la espuma	51
3.2.2.	Caracterización del agregado.....	53
3.2.3.	Determinación del contenido óptimo de humedad de la mezcla.....	55
3.2.4.	Determinación del contenido óptimo de asfalto	55
3.2.5.	Propiedades mecánicas de las mezclas de asfalto espumado	56
3.3.	Muestras de materiales utilizadas para el diseño de las mezclas	57
3.3.1.	Tratamiento de los agregados con asfalto espumado.....	57
3.3.2.	Contenido de humedad y de asfalto	58
3.3.3.	Compactación de las muestras de asfalto espumado.....	58
3.3.4.	Curado.....	59
3.3.5.	Determinación del peso específico aparente de las probetas compactadas.....	59
3.3.6.	Determinación de la resistencia a la tensión indirecta	59
3.3.7.	Determinación del contenido de asfalto.....	61

3.4.	Diseño estructural de la rehabilitación del pavimento	62
3.4.1.	Método AASHTO´93 en el diseño de pavimentos flexibles	62
3.4.2.	Parámetros de diseño	65
3.5.	Protocolo del Reciclado en frío <i>in situ</i> con asfalto espumado	87
4.	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL RECICLADO EN FRÍO IN SITU DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS CON ASFALTO ESPUMADO...	89
4.1.	Definición	89
4.2.	Descripción	90
4.3.	Materiales.....	90
4.3.1.	Requisitos de los materiales.....	90
4.4.	Composición de la mezcla (diseño de la fórmula de trabajo).....	93
4.4.1.	Ensayo de Tracción Indirecta (ITS)	95
4.5.	Equipo	97
4.6.	Requisitos de construcción	99
4.6.1.	Proceso Constructivo	100
4.6.2.	Compactación y Terminación	102
4.6.3.	Protección y mantenimiento de la capa de material estabilizado.....	104
4.6.4.	Limitaciones meteorológicas	104
4.7.	Control de calidad	104
4.8.	Medida	105
4.9.	Forma de pago	106

CONCLUSIONES	111
RECOMENDACIONES.....	113
BIBLIOGRAFÍA.....	115

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Comportamiento de los pavimentos bajo carga	2
2.	Estructura de pavimentos flexibles.....	4
3.	Gráfica de mantenimiento y rehabilitación a través del monitoreo de la calidad de rodado	6
4.	Flujograma del proceso de diseño para la rehabilitación de pavimentos.....	11
5.	Medición de deflexiones para evaluar comportamiento del pavimento bajo carga	18
6.	Ejemplo de ficha de investigación de detalle.....	19
7.	Cámara de expansión	22
8.	Propiedades del proceso de espumación	24
9.	Razón de expansión.....	25
10.	Razón de cambio entre la relación de expansión y la vida media.....	26
11.	Proceso de reciclaje de pavimentos.....	27
12.	Tren de reciclado en un proyecto de rehabilitación.....	29
13.	Clasificación de los agregados.....	53
14.	Nomograma	65
15.	Volumenes de tránsito.....	66
16.	índice de serviciabilidad P_i y P_t	70
17.	Nivel de confiabilidad según funcionalidad.....	71
18.	Formato para calcular el módulo de resiliencia efectivo de la subrasante en pavimentos flexibles	76
19.	Coeficientes de capa para carpeta asfáltica a1.....	78

20.	Coeficientes de capa para variación de los coeficientes de capa a2, en bases granulares	79
21.	Variación de los coeficientes de capa a3 en subbases granulares.....	80
22.	Variación de los coeficientes de capa a2, en bases estabilizadas con cemento	81
23.	Variación de los coeficientes de capa a2, en bases estabilizadas con asfalto	82
24.	Coeficiente estimados sugeridos para materiales estabilizados con asfalto espumado.....	84
25.	Procedimiento para determinar el espesor	85
26.	Procedimiento para determinar el espesor del pavimento con asfalto espumado.....	86
27.	Protocolo del reciclado en frío <i>in situ</i> con asfalto espumado	88

TABLAS

I.	Facilidad del asfalto espumado para dispersarse (capacidad de mezclado)	40
II.	Resistencia a la tracción indirecta de materiales estabilizados con asfalto espumado.....	42
III.	Rangos de Módulos Resilientes típicos para material estabilizado, ensayados en laboratorio.....	43
IV.	Módulos Resilientes para material estabilizado después de alcanzar el estado de régimen (Fase 2)	45
V.	Uso de cantidades de cemento dependiendo el índice de plasticidad	54
VI.	Valores de ZR en la curva normal para diversos grados de confiabilidad	72
VII.	Coeficiente estructural según el material	83
VIII.	Reciclaje de pavimento asfáltico <i>in situ</i> con asfalto espumado.....	91

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
W₁₈	Carga de eje de 18,000 lb
Kg	Kilogramo: 1,000 gramos
Kg/cm²	Kilogramo por centímetro cuadrado
Km	Kilómetros: 1,000 metros
Km/h	Kilómetros por hora
kN	Kilo Newton, dimensional de fuerza: 1,000 kg-m/s ²
Kpa	Kilopascal, es una unidad de presión que equivale a 1,000 pascales
lb	Libra (0.4536 kg)
Mpa	Megapascal es una unidad de presión equivalente a 1,000,000 de pascales.
m	Metro
m/seg	Metros por segundo
Kip	Mil libras por pulgada cuadrada (453.6 Kg)
N	Newton se define como la fuerza necesaria para proporcionar una aceleración de 1m/seg ² a un objeto de 1 kg. Masa.
P₀	Nivel de servicio inicial del pavimento
P_f	Nivel de servicio final del pavimento
Pa	Pascal se define como la presión que ejerce una fuerza de 1 N sobre una superficie de 1 m ² normal a la misma.
s	Segundo

t	Tonelada métrica (2,2046 lb)
ton	Tonelada Inglesa (907.18 kg)
S	Velocidad o speed

GLOSARIO

AASHO	The American Association of State Highway Officials o Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras Estatales
AASHTO	The American Association of State Highway and Transportation Officials o Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras Estatales y Transporte
Briqueta	Es un anglicismo con el cual se denomina al espécimen formado por un molde de acuerdo a la prueba a realizar.
CBR	California Bearing Ratio (Ensayo e de California)
CDP	Cone Dinamic Penetration
Contratista	La persona, compañía o empresa o sociedad mercantil que convenga con el contratante el contrato correspondiente a la ejecución de determinada obra.

Deformación	La deformación de un pavimento es cualquier cambio que presente el pavimento con relación a su forma original.
Delegado Residente	El representante, debidamente autorizado, en quien se ha delegado la responsabilidad de la Supervisión de la ingeniería sobre la construcción.
DGC	Dirección General de Caminos
Eje de Carga Equivalente, ESAL	Es la suma del total de ejes equivalentes de 18,000 lb (80 kN, 8.2 t), aplicados al pavimento por todos los vehículos que circularán por la carretera durante el período de diseño.
Eje simple	Es el eje que está compuesto por dos ruedas, una en cada extremo.
ESAL	Equivalent Single Axle Load o Carga Equivalente por Eje.
Especificaciones	El vocablo general aplicado a todas las normativas, disposiciones y requisitos relativos a la ejecución de la obra.

Especificaciones Especiales	Complemento y/o revisión de las Especificaciones Generales, que abarcan las condiciones peculiares de la obra.
Especificaciones Generales	Las especificaciones contenidas en las Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes de la DGC.
Estructura del pavimento	La combinación de la subbase, base y superficie de rodadura, colocadas sobre una subrasante para soportar y distribuir las cargas del tránsito a la subrasante de la carretera.
FC	Factor Camión
FHWA	Federal Highway Administration
Filler	Típico filler el cemento.
Flexibilidad	La habilidad de un pavimento para ajustarse a cambios en la sub-rasante.
FWD	Falling Weigth Deflectometer

IRI

Índice de Rugosidad Internacional

Índice de serviciabilidad

En Inglés Presente Serviciability Index, AASHTO lo define como un número abstracto que representa la capacidad de un pavimento de servir al tipo de tránsito de diseño, varía desde 5 perfecto, hasta 0 intransitable.

Kilogramo

Unidad básica de masa del Sistema Internacional de Unidades, corresponde a la masa del Kilogramo Prototipo Internacional, conservado en París, Francia.

LEF

Load Equivalent Factor o Factor Equivalente de Carga

Libra

Unidad de peso antiguo en ingeniería en los países de habla inglesa, equivalente a 0.4536 kg.

Método AASHTO

Originado del AASHO Road Test realizado en 1958, para analizar el comportamiento de diferentes estructuras de pavimento sometidas a cargas en movimiento de magnitud y frecuencia conocida.

Nivel de Servicio	Medida cualitativa para caracterizar las condiciones de operación bajo una circulación continua de tránsito, según la percepción de pilotos y pasajeros.
Número Estructural	AASHTO lo define como un número abstracto que representa la resistencia estructural de un pavimento, para un combinación dada de las características de materiales, ESAL, P_t y condiciones ambientales.
PCI	Pavement Condition Index o Índice de Condición del Pavimento
Planos	Todos los planos, o reproducción de ellos, relativos a la construcción de la obra.
PSI	Pound Square Inch, medida de resistencia en libras por pulgada cuadrada
RAP	Recycled Asphalt Pavement
Rehabilitación	Ejecución de las actividades constructivas necesarias para restablecer las condiciones físicas de la carretera a su situación como fue construida originalmente.

Sección transversal	La sección vertical del terreno o estructura en ángulo recto respecto a la línea central de la obra.
Serviciabilidad inicial	Parámetro del nivel de servicio inicial para un pavimento nuevo con valores de IRI menores de 2.
Serviciabilidad final	Parámetro del nivel de servicio final para un pavimento en uso con valores de IRI mayores de 6.
SIECA	Secretaría de Integración Económica Centroamericana
SN, (NE)	Structural Number o (Número Estructural)
TIR	Tasa Interna de Retorno
Tonelada métrica	Peso de mil kilogramos o 2,2046 lb.
Tonelada Inglesa	Peso de dos mil libras, equivalente a 907.18 kg.
TPDA	Tránsito Promedio Diario Anual

Tránsito

Circulación de personas y vehículos por calles, carreteras, etc.

Unidad de pago

Unidad de medida establecida para un renglón determinado del contrato, con base a la cual se hace la medición para proceder al pago del trabajo realizado por el Contratista en ese apartado.

VPN

Valor presente neto

RESUMEN

Existe una serie de técnicas para extender la vida útil del pavimento. Estas se pueden clasificar en: conservación y rehabilitación. La diferencia entre ambas radica en que la conservación restaura la condición funcional y la rehabilitación la condición estructural del pavimento.

En el presente trabajo se analiza el problema que representa para las entidades encargadas de la conservación vial, los trabajos de rehabilitación de pavimentos asfálticos que conforman la red vial pavimentada del país. Dentro de la Ingeniería Vial se tiene una amplia gama de opciones como alternativas de rehabilitación que van desde las tradicionales hasta las más modernas, como lo constituye el reciclado en frío de pavimentos asfálticos con la tecnología del asfalto espumado. Evidentemente, depende de los recursos económicos con los que se cuenta para realizar el proyecto. Como esta tecnología se ha impuesto a las tradicionales por las ventajas económicas, energéticas y ambientales que representa; su implementación en el país se ha incrementado considerablemente, provocando como consecuencia la construcción de varios proyectos de rehabilitación usando esta tecnología.

Se analizan en este trabajo los diferentes tipos de pavimentos que constituyen la superficie de rodadura de una carretera, la composición del paquete estructural y las diferentes alternativas de mantenimiento y rehabilitación vial que proporciona el reciclado en frío *in situ* con asfalto espumado. Además se destaca la importancia de una investigación preliminar y detallada por medio de inspecciones técnicas *in situ* y ensayos de mecánica de suelos. Los que permiten elaborar un diagnóstico para identificar las zonas o

tramos homogéneos del proyecto a través de las diferentes capas, espesores, composición de los materiales que conforman la estructura del pavimento objeto de estudio.

También se hace un enfoque de los principios en los cuales se fundamenta la tecnología del asfalto espumado, sus principales beneficios y aplicaciones en los proyectos donde se utiliza. Se hace referencia a los principales agentes estabilizadores utilizados para aumentar las propiedades de ingeniería de los agregados que aporta el pavimento existente.

Se determinan las cantidades de agentes estabilizadores, agua y asfalto para el diseño de mezclas para optimizar las propiedades de los agregados con el asfalto espumado, y luego a través de ensayos de laboratorio obtener las resistencias máximas, simulando con un equipo especial de laboratorio las condiciones del terreno. Así mismo, se describen los aparatos de laboratorio utilizados para cada ensayo.

Se hace una consideración y análisis del diseño estructural para la rehabilitación de pavimentos reciclados en frío con asfalto espumado a través del Método de Diseño de Pavimentos recomendados por la AASHTO '93.

Se hace énfasis en las principales variables de diseño de este método y luego por medio de la Ecuación General de Diseño o de los nomogramas respectivos se determinan los valores del Número Estructural.

Se determinan previamente los parámetros de diseño iniciando con los estudios de volúmenes de tránsito proyectados al período de diseño y luego transformarlos a ejes equivalentes de 80 kN o 18 Kips para calcular los ESAL's. Estos son afectados por los factores de carril y de dirección. Seguidamente se

calculan los espesores de capa que conforman la estructura de pavimento a través de la ecuación de espesores de capa de la AASHTO'93.

Con el uso generalizado del reciclado en frío en Guatemala, se hace imperativo su normatividad dentro de las Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos de Guatemala, debido a que actualmente no se cuenta el área centroamericana con una regulación sobre esta materia; motivo por el cual el presente trabajo de tesis de graduación propone las recomendaciones pertinentes para incluirlas en dichas especificaciones y de esta forma llenar el vacío existente dentro de la Ingeniería Vial Guatemalteca.

OBJETIVOS

General

Describir el uso del reciclado en frío *in situ* en la rehabilitación de pavimentos flexibles con asfalto espumado y elaboración de propuesta de especificaciones técnicas de construcción para Guatemala.

Específicos

1. Diagnosticar y evaluar las condiciones superficiales de la capa de rodadura del pavimento para determinar el grado de deterioro que presenta la estructura de pavimento y evaluar la aplicación del reciclado en frío con asfalto espumado como una opción de rehabilitación.
2. Describir e identificar las características físicas y mecánicas de los materiales que conforman las capas de la estructura de pavimento del camino existente a través de estudios geotécnicos y simulaciones en el laboratorio con equipo especializado.
3. Establecer la metodología del diseño de la mezcla de los agregados con asfalto espumado, así como también diseñar la nueva estructura del pavimento conforme AASHTO 1993.
4. Establecer especificaciones técnicas para el reciclado en frío de pavimentos flexibles con asfalto espumado en proyectos de rehabilitación de carreteras.

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En Guatemala la mayoría de las carreteras existentes ya cumplieron su período de vida útil y en la actualidad se han deteriorado considerablemente, ocasionando una paulatina reducción en los estándares de su infraestructura vial. Los caminos pavimentados sufren constantes y acelerados daños en su estructura debido al incremento de las cargas de tránsito, a las condiciones climáticas a las que son sometidos y adicionado a esta situación la falta de mantenimiento preventivo.

Sí no se cuenta con un apropiado sistema de gestión de mantenimiento vial, las carreteras pueden transformarse en poco tiempo en caminos intransitables con un bajo nivel de servicio, provocando problemas para los usuarios de la vía, como: demoras en el tiempo de viaje, aumento en los costos de operación vehicular, congestionamientos vehiculares, velocidades de operación muy por debajo de su velocidad de diseño, etc.

Debido a la falta de un mantenimiento efectivo y oportuno y de acuerdo al nivel de severidad que presentan las fallas en la estructura del pavimento se hace necesaria su rehabilitación para permitir de nuevo la fluidez del tránsito de una manera eficiente en el tramo. Para solucionar esta problemática se hace necesario evaluar diferentes alternativas de rehabilitación que permitan restablecer las condiciones originales de la carretera. En Guatemala se tiene el inconveniente de que cada año los presupuestos son más reducidos por la pérdida del valor adquisitivo de la moneda de curso legal.

La rehabilitación tradicional de carreteras consiste en la remoción y desalojo de la estructura de pavimento existente, restituyéndose por una totalmente nueva lo que requiere de grandes presupuestos. Ante esta rehabilitación tradicional surge como alternativa la técnica del reciclado en frío *in situ* con asfalto espumado para la rehabilitación de pavimentos flexibles que aprovecha los materiales del pavimento existente, constituyendo por consiguiente una alternativa más económica.

En los Estados Unidos, según un estudio realizado por la Federal Highway Administration (FHWA) y la Agencia de Protección Ambiental, el asfalto es el material más reciclado, pues se reutiliza cerca del 90% del pavimento removido de las carreteras. En algunos proyectos se han obtenido ahorros hasta del 30% lo que la hace una técnica de rehabilitación muy utilizada en muchos países del mundo. En Guatemala esta tecnología está siendo empleada por la entidad de conservación vial en algunos proyectos de rehabilitación con bastante éxito, pero sin que a la fecha existan especificaciones técnicas que regulen su construcción.

Para la aplicación de la tecnología de reciclado en frío con asfalto espumado surgen las siguientes interrogantes:

¿Qué aplicación tiene el reciclado en frío con asfalto espumado para la rehabilitación de pavimentos flexibles en Guatemala?

¿Existen especificaciones técnicas de construcción para el reciclado en frío con asfalto espumado a través de los manuales regionales de construcción de pavimentos de la SIECA o en las Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos?

Las preguntas formuladas constituyen el objetivo general del presente estudio.

En los pavimentos asfálticos donde es necesario realizar proyectos de rehabilitación y se considere el reciclado de pavimentos flexibles con asfalto espumado como una alternativa, se hace imperativo hacer los siguientes cuestionamientos:

- ¿Qué evaluaciones técnicas deben realizarse a la estructura del pavimento?
- ¿Cómo se aplica la técnica del asfalto espumado?
- ¿Qué técnicas de reciclado existen?
- ¿Qué beneficios aporta el reciclado en la rehabilitación de pavimentos flexibles?
- ¿Cuáles son los análisis de laboratorio de suelos que se deben realizarse a los materiales aportados por el pavimento existente?
- ¿Cómo se diseña la mezcla de los agregados con asfalto espumado?
- ¿Cuáles son las características requeridas más importantes de los materiales a mezclar con asfalto espumado?
- ¿Qué método de diseño de pavimentos es el más recomendable?
- ¿Cómo se diseña la estructura de pavimento en la rehabilitación de los pavimentos flexibles?
- ¿Cuáles son los parámetros de diseño del pavimento?

El desarrollo del presente trabajo de tesis permitirá responder a las preguntas formuladas anteriormente.

BREVE DESCRIPCIÓN DEL ENFOQUE METODOLÓGICO

- El presente trabajo de investigación tiene un enfoque cualitativo y con diseño descriptivo.
- La variable dependiente está constituida por el reciclado en frío con asfalto espumado.
- La variable independiente por la rehabilitación del proyecto.
- Se utilizó el método descriptivo, donde se realizó un análisis documental de los conceptos técnicos de la metodología.
- Las técnicas de investigación de la información que se utilizó fueron realizadas a través de la consulta de la literatura pertinente.
- Se utilizaron métodos estadísticos para determinar medidas de tendencia central como: promedios, desviaciones estándar, 15 percentil, desviaciones respecto al promedio para analizar los estudios de tránsito y sus proyecciones durante el período de diseño y el diseño de la estructura del pavimento.
- Finalmente se procedió al análisis de los resultados y a redactar las conclusiones y recomendaciones del presente trabajo de tesis de graduación.

INTRODUCCIÓN

Con el desarrollo del presente trabajo se dará a conocer el proceso constructivo en nuestro medio del reciclado en frío *in situ* con asfalto espumado a los profesionales de la ingeniería civil que están involucrados en el campo de la rehabilitación de los pavimentos flexibles. Esta tecnología permite la reutilización o reciclaje de los materiales que forman parte de la estructura del pavimento existente, obteniéndose como consecuencia de ello ventajas económicas y ambientales.

La superficie de rodadura es la única parte visible del camino. Bajo la misma, existe una estructura que está conformada por varias capas de distintos materiales. La carga de los vehículos se transmite a la capa de sub-rasante (la capa que se encuentra debajo de la estructura de pavimento). Debido a las cargas constantes del tránsito y las condiciones ambientales los pavimentos sufren deterioro durante el transcurso de su vida de diseño, por lo que al final de ésta se hace necesaria su rehabilitación.

El reciclado en frío *in situ* con asfalto espumado es aplicable cuando se requiere rehabilitar estructuras de pavimentos deteriorados que presentan diversos tipos de falla como baches, cuero de lagarto, grietas, etc., principalmente conformadas por bases granulares y superficies asfálticas de concreto asfáltico o tratamientos superficiales. El reciclado de pavimentos flexibles *in situ* con asfalto espumado consiste en la desintegración de los materiales del pavimento existente por medios mecánicos especiales, adicionando agregado nuevo en algunos casos; y mezclando estos materiales con agentes estabilizadores como el cemento Portland, adicionándole asfalto a

una temperatura de 180 °C y agua fría y aire. Debido a esta transferencia calorífica entre ambos, se produce instantáneamente vapor formándose una burbuja. Esta burbuja al explotar se adhiere a los agregados finos, conformando una pasta que actúa como mortero aglutinándose de esta manera con los agregados gruesos y como resultado de esta adhesión se obtiene una base asfáltica estabilizada. La profundidad de la estabilización varía entre 15 y 25 centímetros de acuerdo al diseño de la mezcla de los agregados con asfalto espumado.

Con el proceso de reciclado se mejora la capacidad estructural del pavimento. Se puede incrementar esta capacidad, con la colocación de una capa de rodadura adicional de mezcla asfáltica en caliente sobre la base estabilizada.

En el capítulo 1 se describe los distintos tipos de pavimentos que existen, las alternativas con asfalto espumado de pavimentos flexibles de las cuales se dispone en la Ingeniería Vial, la importancia durante el proceso de diseño de la obtención de la información histórica disponible sobre el proyecto, así como la determinación de los tramos homogéneos mediante las inspecciones visuales y análisis de laboratorios destructivos y no destructivos, así como el análisis económico del proyecto de rehabilitación que haga viable su realización.

En el capítulo 2 se refiere a la tecnología del asfalto espumado y sus diversas aplicaciones dentro del mantenimiento y rehabilitación de carreteras, análisis de sus propiedades, diferentes tipos de reciclado superficial o profundo, dependiendo del tipo de falla que presente el pavimento evaluado y sus beneficios ambientales, económicos, rapidez de construcción, seguridad. Además se indican los diferentes tipos de agentes estabilizadores que se utilizan en la rehabilitación de pavimentos flexibles.

Los diseños de las mezclas de los agregados optimizando las propiedades del asfalto espumado. También se hace énfasis especial en el aseguramiento de la calidad durante el proceso de construcción de la obra, mediante controles de laboratorio en el lugar del proyecto. Además, se analiza el diseño estructural del pavimento de conformidad con los parámetros de diseño de la American Association of State for Highways and Transportation Officials (1993). Estos temas son abordados ampliamente en el capítulo 3.

En el capítulo 4 se presenta una propuesta sobre las Especificaciones Técnicas de construcción que deben observarse en los proyectos de reciclado en frío *in situ* para la rehabilitación de pavimentos flexibles con asfalto espumado que podrían ser incorporadas a las Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos de la República de Guatemala.

A título personal, este trabajo pretende que las Especificaciones Técnicas sean incorporadas a las Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos y de ser posible ser consideradas para formar parte del Manual Centroamericano de Mantenimiento de Carreteras de la Secretaría de Integración Económica Centroamericana (SIECA) debido a que se carece de una normativa de construcción a nivel nacional y centroamericano relacionada con este tema.

La adopción de las Especificaciones Técnicas contribuirá a que el proceso de rehabilitación de pavimentos flexibles con asfalto espumado sea realizado con el aseguramiento de la calidad de la obra que se requiere y una práctica sana de la ingeniería vial donde sea utilizada esta tecnología.

1. REHABILITACIÓN DE PAVIMENTOS FLEXIBLES

1.1. Estructura de pavimento

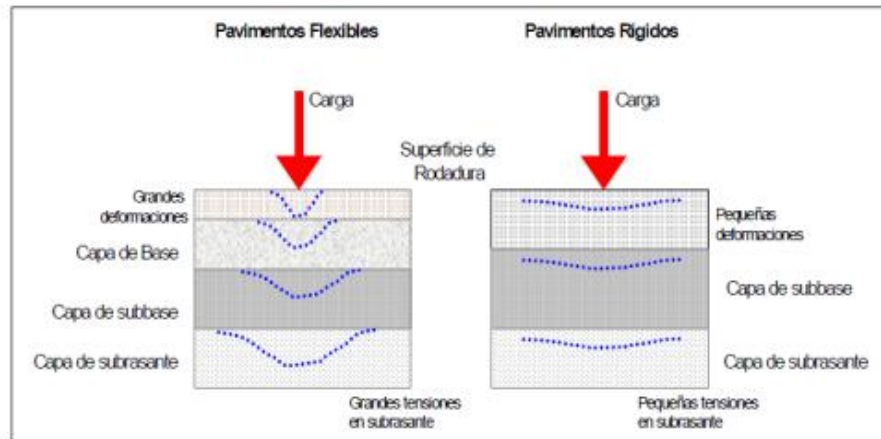
Es una estructura, constituida generalmente por una capa de rodadura (concreto asfáltico o hidráulico) apoyado sobre una capa de material granular clasificado denominado (base). A su vez dicha capa descansa firme en la capa de material granular llamado subbase. Capas que en su conjunto forman la estructura del pavimento.

1.1.1. Tipos de pavimentos

Rígidos: aquellos pavimentos construidos con losas de concreto hidráulico. Debido a la consistencia de la superficie de rodadura, se produce una buena distribución de las cargas originando tensiones muy bajas en la subrasante.

Flexibles: los construidos utilizando una capa de material asfáltico (cemento asfáltico, emulsión, etc.), la superficie de rodadura al tener menos rigidez, se deforma más y se producen mayores tensiones en la sub-rasante. En la figura 1 se observa el comportamiento de los pavimentos bajo la sollicitación de las cargas.

Figura 1. **Comportamiento de los pavimentos bajo carga**



Fuente: SIECA. Manual Centroamericano para diseño de pavimentos. 2004. Cap. 5, p.1.

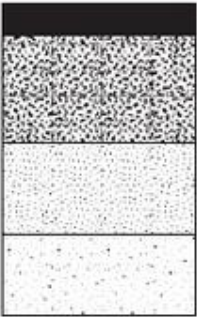
1.1.2. Componentes estructurales del pavimento flexible

El desempeño de una estructura de pavimento está altamente influenciada por tres parámetros principales los cuales son: subrasante, estructura de pavimento y carpeta de rodadura.

- **Subrasante:** es la capa de terreno de una carretera que soporta la estructura del pavimento y se extiende hasta una profundidad que no afecte la carga de diseño que corresponde al tránsito previsto. Puede estar formada en corte o relleno y una vez compactada debe de tener las secciones transversales y pendientes especificadas en los planos finales de diseño. Deberá cumplir con los requisitos de resistencia, incompresibilidad e inmunidad a la expansión y contracción por efectos de la humedad. El diseño de un pavimento es esencialmente el ajuste de la carga de diseño por rueda a la capacidad de la subrasante.

- Subbase: es la capa de la estructura del pavimento destinada fundamentalmente a soportar, transmitir y distribuir con uniformidad las cargas aplicadas a la superficie de rodadura del pavimento, de tal manera que la capa de subrasante la pueda soportar absorbiendo las variaciones inherentes a dicho suelo que puedan afectarle. La subbase debe controlar los cambios de volumen y elasticidad que serían dañinos para el pavimento.
- Base: es la capa del pavimento que tiene como función primordial, distribuir y transmitir las cargas ocasionadas por el tránsito, a la subbase y a través de ésta a la sub-rasante de tal forma que no le produzca deformaciones perjudiciales. Es la capa sobre la cual se coloca la capa de rodadura.
- Carpeta de rodadura: es la capa que se coloca sobre la base. Constituidas por material pétreo y un producto asfáltico, siendo su función proporcionar al tránsito una superficie estable, uniforme y de textura apropiada. Su objetivo principal es proteger la estructura del pavimento, impermeabilizando la superficie, para evitar filtraciones de agua de lluvia que podrían saturar las capas inferiores. Evita la desintegración de las capas subyacentes a causa del tránsito de vehículos. Así mismo, la carpeta de rodadura contribuye a aumentar la capacidad de soporte del pavimento, absorbiendo las cargas si su espesor es apreciable, excepto el caso de tratamientos superficiales, ya que para estos se considera nula. Las diferentes capas que conforman la estructura del pavimento flexible se observan en la figura 2.

Figura 2. Estructura de pavimentos flexibles

	Posición relativa en la estructura	Material de construcción
Estructura típica de pavimentos flexibles		Asfalto o sello asfáltico
		Mezcla asfáltica/granular estabilizado con asfalto o cemento/granular
		Granular estabilizado con asfalto o cemento /granular
		Granular estabilizado con cemento/granular/material in-situ

Fuente: Wirtgen, Manual de reciclado en frío. 2004. p. 19.

1.2. Alternativas de mantenimiento y rehabilitación

Existe una serie de técnicas para extender la vida útil del pavimento. Estas se pueden clasificar en: Conservación o Mantenimiento y Rehabilitación. La diferencia entre ambas radica en que el mantenimiento restaura la condición funcional y la rehabilitación la condición estructural del pavimento.

Para la conservación y mantenimiento vial las autoridades encargadas de las redes viales deberían de utilizar el sistema de base de datos, llamado Sistema de Administración de Pavimentos PMS (Pavement Management System), para monitorear de forma continuada la calidad de la superficie de rodadura de la red vial y oportunamente tomar la decisión sobre el mantenimiento y/o rehabilitación de un pavimento.

1.2.1. Mantenimiento o Conservación

Las alternativas de conservación o mantenimiento del pavimento se refieren a las acciones llevadas a cabo para proteger el camino de la humedad tratando de mantenerla alejada para evitar daños a su estructura. Los drenajes tanto longitudinales como transversales deberán de tener el mantenimiento preventivo necesario para evitar azolvamientos que hagan colapsar las estructuras de drenaje. Así mismo, deberán sellarse las fisuras que se presenten en la superficie de la capa de rodadura para evitar filtraciones que afecten su resistencia a las cargas del tránsito y evacuar el agua fácilmente a través de las cunetas para evitar los estancamientos. También los efectos producidos por el envejecimiento u oxidación del asfalto pueden ser tratados efectivamente con la aplicación de un sello asfáltico. El deterioro del pavimento es un proceso lento. Los factores que causan deterioro en los pavimentos son los efectos del medio ambiente y las cargas del tránsito.

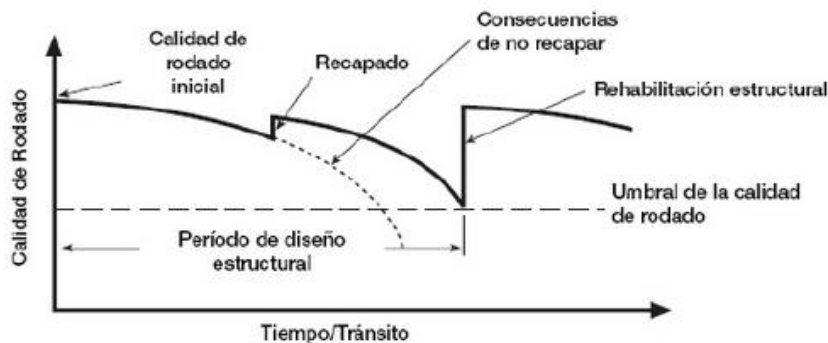
1.2.2. La Rehabilitación

La rehabilitación se refiere a la ejecución de las actividades constructivas necesarias para restablecer las condiciones físicas de la carretera a su condición original.

Es necesaria la rehabilitación de los pavimentos cuando estos ya han cumplido con su vida útil. Como el mantenimiento no se realiza periódicamente y cuando éste se realiza, el proceso de deterioro es tal que la rehabilitación total del camino es imperativa, esto sucede debido a que no se cuenta con un sistema efectivo de administración de pavimentos en la red vial nacional.

Las opciones de rehabilitación dependerán de los recursos económicos con los que cuente la Institución responsable y el período de diseño para el cual se requiere el proyecto. En la figura 3 se puede apreciar la etapa de mantenimiento y luego de rehabilitación a través del tiempo durante el período de análisis.

Figura 3. **Gráfica de mantenimiento y rehabilitación a través del monitoreo de la calidad de rodado**



Fuente: Wirtgen, *Manual de reciclado en frío*. 2004. p. 24.

Rehabilitación superficial de la capa de rodadura

La rehabilitación superficial se refiere a los trabajos cuando el deterioro del pavimento se presenta a una profundidad de 50 a 100 milímetros de la superficie del pavimento. Este deterioro normalmente está asociado al envejecimiento y al fisuramiento de la capa de rodadura debido a la acción de las cargas de tráfico y los efectos del medio ambiente.

Los métodos de rehabilitación superficial más comúnmente usados son:

- Recapeo asfáltico
 - Recapeo delgado de 4-5 cm. de mezcla asfáltica en caliente sobre la superficie de rodadura existente.

- Fresado del pavimento
 - Fresar y reemplazar la capa deteriorada por agrietamiento de la capa de rodadura, algunas veces se colocan asfaltos modificados (SMA) para mejorar su capacidad estructural.

- Reciclar una capa delgada
 - Se asume que se tiene un espesor de capa de rodadura suficiente. Se realiza en el mismo lugar de la obra.

Rehabilitación estructural del pavimento

Se hace necesaria la rehabilitación estructural del pavimento cuando la estructura del pavimento está deteriorada y también los materiales que la conforman. Es una solución a largo plazo. Cuando se mejora el estándar de un pavimento existente es una forma de rehabilitación estructural. La consolidación de los materiales debido a las cargas del tráfico toma varios años por lo que el material en este estado de densificación no debería ser perturbado para no alterar la resistencia que estas capas subyacentes han alcanzado con el transcurso de los años.

Varias opciones para la rehabilitación estructural incluyen:

- Reconstrucción total

Se refiere a la reconstrucción total de las capas estructurales del pavimento existente, donde además pueden considerarse cambios del alineamiento horizontal y vertical para una mejora en el diseño geométrico del trazo. Esencialmente implica eliminar el material existente y construir de nuevo el paquete estructural.

- Construcción de capas adicionales

Cuando se realiza la construcción de capas adicionales de base y capa de rodadura previo fresado del pavimento existente.

- Reciclado profundo

Es el reciclado que se realiza hasta donde se encuentra el problema que está ocasionando la falla, mezclándola con agentes estabilizadores para formar una nueva capa homogénea y gruesa. Capas adicionales pueden ser colocadas sobre la superficie reciclada. Los agentes estabilizadores se adicionan al material reciclado, principalmente en tratamientos superficiales donde el aporte a la estructura de pavimento es marginal y se requiere aumentar su resistencia. Adicionalmente al recuperar el material de las capas superiores, las inferiores no sufren ninguna alteración y su consolidación permanece intacta.

- Reciclado *in situ* y en planta

Consiste en remover parte del material de la superficie de rodadura hacia un lugar de acopio. Seguidamente se procede al reciclado del material subyacente. El material que se encuentra en el lugar de acopio, es tratado en la planta de asfalto y colocado sobre la superficie del material reciclado *in situ* como una nueva capa de rodadura con las adiciones de nuevo material pétreo y asfáltico conforme especificaciones de construcción.

Todas estas opciones de rehabilitación de los pavimentos con reciclado a ser consideradas están en función del costo/beneficio del proyecto, la disponibilidad de recursos que se tenga por parte de la Autoridad Vial y el período de diseño que se requiere, identificación de alternativas de rehabilitación, diseño de mezclas y diseño de la estructura de pavimento y evaluación económica de las opciones de rehabilitación.

1.3. Flujo del Proceso de diseño para la rehabilitación de pavimentos con asfalto espumado

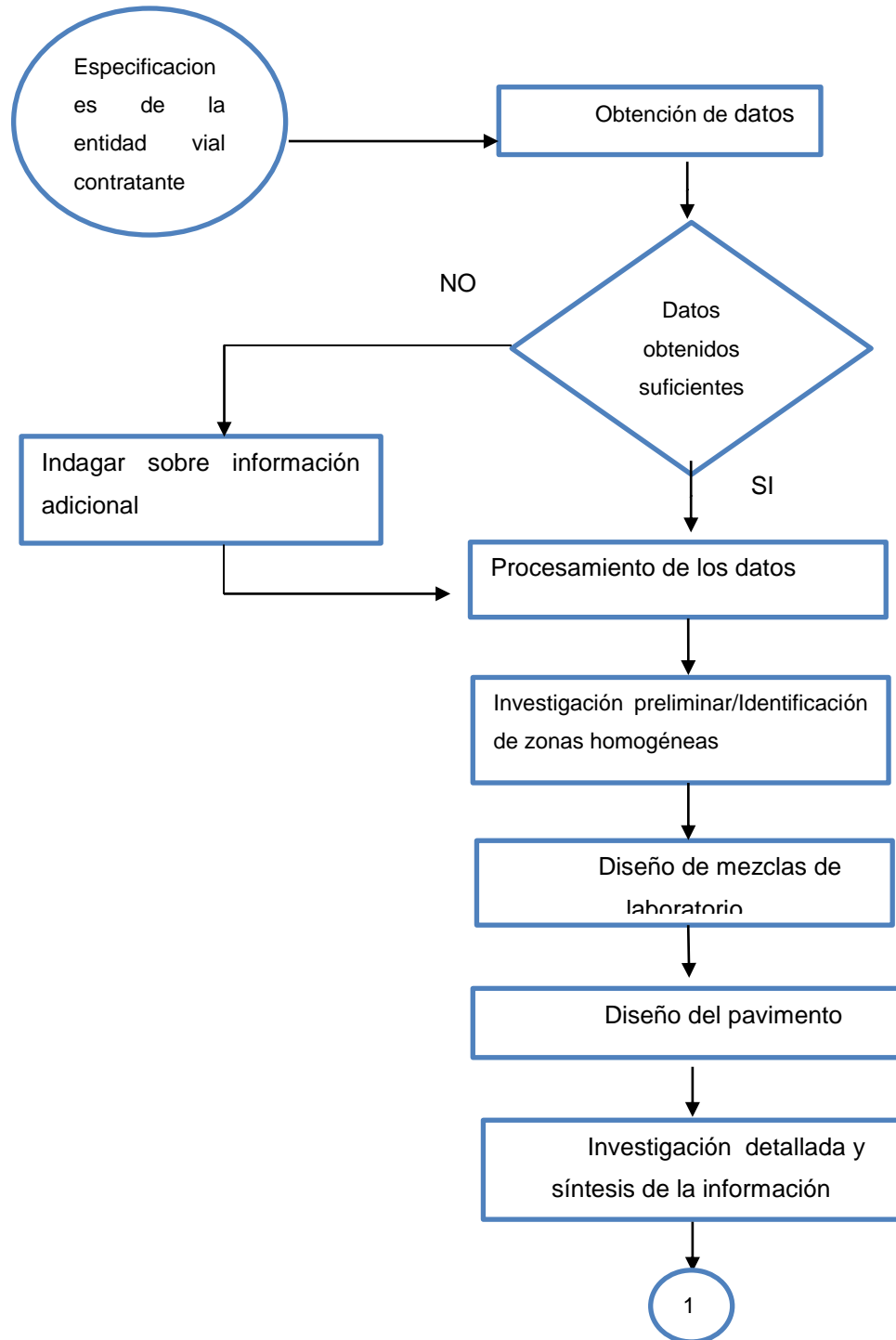
En el diagrama de flujo que se presenta se observa el proceso de diseño en un proyecto de rehabilitación para evaluar la viabilidad para la ejecución del proyecto de reciclado en frío *in situ* con asfalto espumado.

El proceso de diseño de rehabilitación de pavimentos deberá de incluir:

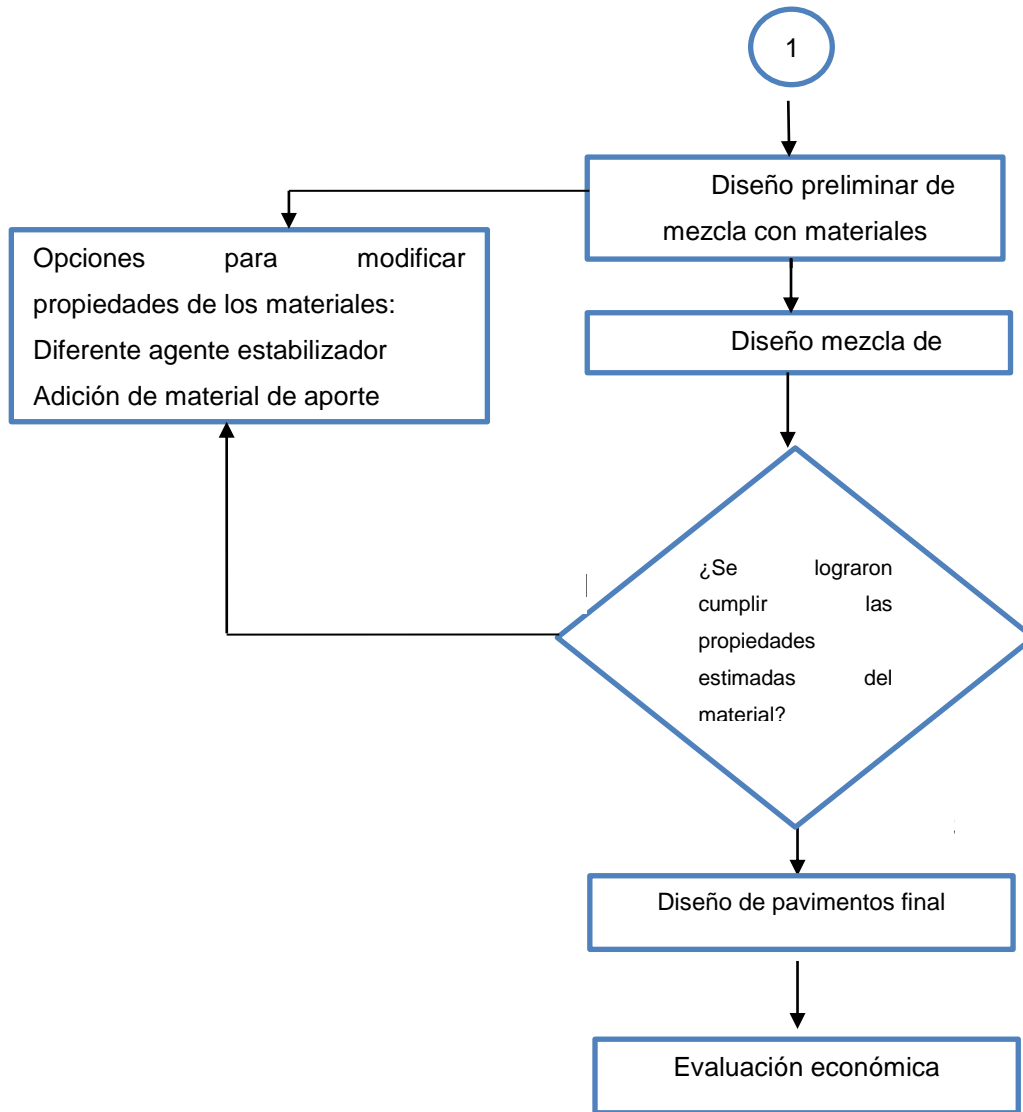
- Obtención y procesamiento de la información disponible investigando todo lo relacionado con el proyecto.
- Inspección técnica y visual para determinar las causas del deterioro del pavimento existente.

- Análisis del volumen de tránsito.
- Identificación de opciones de rehabilitación.
- Diseño de mezcla de los materiales de aporte y con asfalto espumado.
- Diseño de la estructura de pavimento.
- Análisis económico para la selección de la alternativa de rehabilitación.

Figura 4. **Flujograma del proceso de diseño para la rehabilitación de pavimentos**



Continuación de la figura 4.



Fuente: Wirtgen, Manual de reciclado en frío. 2004. p. 45.

1.3.1. Obtención de la información disponible

La adquisición de la información disponible consiste en obtener de la entidad responsable la información histórica, como el período diseño del proyecto: sea éste a corto o largo plazo; qué nivel de recursos se destinará

para el mantenimiento rutinario del pavimento: se espera que no haya mantenimiento por un largo período de tiempo, cuáles son las capacidades de mantenimiento local, desde el punto de vista mano de obra, equipos y conocimientos; banco de materiales disponibles; tránsito promedio diario que circulará por el tramo a rehabilitar: conteos de tránsito históricos y actuales, porcentaje de vehículos pesados, cargas legales por eje y estadísticas de sobrecarga de los vehículos.

- La estructura del pavimento actual

La información histórica del pavimento existente deberá contener:

- Especificaciones originales de diseño de la estructura del pavimento.
 - Tipos, calidades y espesores de las diferentes capas que conforman la estructura.
 - Bancos de materiales utilizados en el proyecto.
 - Registros meteorológicos del lugar de proyecto.
 - Información geológica del lugar de proyecto.
- Estudios del tránsito

Los estudios de volumen y tipo de tránsito que circularán por el proyecto sujeto a rehabilitación son de vital importancia, constituyen la base fundamental sobre la cual se diseñará la nueva estructura del pavimento. A esto se le denomina la “capacidad estructural” del pavimento, y se define como la cantidad y tipo de carga a la cual estará sometido un pavimento antes de fallar. La capacidad estructural o “tránsito de diseño” o la “capacidad de soporte” se

expresan en términos de millones de “Ejes Equivalentes” (Equivalent Standard Axle Load, ESAL).

De tal manera que los pavimentos son diseñados para una capacidad estructural específica y para resistir las cargas de tránsito estimadas durante la vida de diseño. Por lo tanto cualquier cambio en el tránsito estimado causará un impacto en su vida útil de diseño.

Los pronósticos del volumen y tipo de tránsito futuro, deben obtenerse de los estudios detallados y elaborados por la Institución contratante los que deberán de ser lo más apegado posible a la realidad, ya que, la vida del proyecto es para un mediano o largo plazo. Sí no se dispone de información confiable deberá de realizarse los estudios de conteo de tránsito para obtener información exacta sobre la cantidad y tipo de vehículos que circulan por el camino. La información relacionada con el tipo de vehículos, presión de los neumáticos y cargas por eje deberá de registrarse durante el conteo de tráfico. Seguidamente deberán de hacerse las proyecciones necesarias para determinar el tránsito futuro probable que circulará durante el período de diseño en el proyecto.

- Caracterización climatológica

Es necesario investigar las condiciones climatológicas y meteorológicas del lugar del proyecto por medio de la Institución que proporciona esta información. Es conveniente consultar y analizar la información de las estaciones meteorológicas cercanas al proyecto. En Guatemala es la entidad estatal denominada Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH) la encargada de llevar el registro y control de los datos estadísticos al respecto.

1.3.2. Investigaciones Preliminares del pavimento existente

Puede realizarse a través de la evaluación superficial del pavimento con el método PCI (Pavement Condition Index), en el cual es determinado el estado de un pavimento en términos de su integridad estructural y su nivel de servicio.

Deberán de investigarse la homogeneidad de las zonas donde cada tramo tiene una geometría, estructura, tipo de tránsito y características de condición uniformes en toda su longitud. Por lo general éstas varían en largas distancias, ya que dependen de la disponibilidad de los materiales en el entorno del proyecto, es decir, que los materiales utilizados durante la construcción y cada una de las capas individuales que conforman su estructura varían a lo largo de las zonas, secciones o tramos homogéneos.

- Determinar tramos homogéneos

Estos tramos o secciones homogéneas al estar constituidas por los mismos tipos de materiales y con características físicas y mecánicas similares se caracterizan por presentar la misma patología de daño en su estructura en respuesta a las cargas de tránsito que soportan.

- Inspección y evaluación técnica *in situ*

El camino se divide en una serie de zonas homogéneas las cuales son necesarias identificar a través de una inspección visual para establecer los tipos de falla de la superficie que presenta. Los caminos pavimentados generalmente no son homogéneos en distancias largas. La geología subyacente, como los materiales utilizados en la construcción del paquete estructural del pavimento varían a lo largo del proyecto. Un camino consta de

varias secciones homogéneas de distintas longitudes con similar composición y comportamiento bajo las cargas vehiculares. Reflejando en la superficie generalmente los mismos síntomas de deterioro cuando se refiere al mismo tramo homogéneo.

1.3.3. Investigación Detallada

En cada zona homogénea identificada se requiere una investigación detallada para evaluar la estructura del pavimento y para determinar el soporte de la sub-rasante existente *in situ*. Esta evaluación se efectúa con los métodos más comúnmente utilizados como son:

- Excavación de calicatas

La excavación de calicatas a cielo abierto en el pavimento existente es muy importante porque se obtiene una apreciación visual útil de las capas y los materiales que la conforman y proporcionan la oportunidad de tomar muestras para ensayos de laboratorio de suelos. Con las calicatas se puede obtener información como:

- Espesores de las capas individuales
- Contenido de humedad *in situ*
- Densidad de compactación de cada capa
- Profundidad de la falla en la superficie de rodadura

- Extracción de núcleos

Permiten identificar los espesores de los materiales ligados como asfalto y capas estabilizadas. Son ensayos para conocer su composición volumétrica y propiedades de ingeniería.

- Ensayos de laboratorio de suelos

Los ensayos típicos incluyen: granulometría, límites de Atterberg, CBR y la relación humedad/densidad. Los resultados son usados principalmente para la clasificación de materiales, la cual nos indica los parámetros relevantes como el Módulo Elástico a utilizar en el análisis de la estructura de pavimento existente. Estos también son útiles en la selección de las medidas apropiadas de rehabilitación, como la compatibilidad con los distintos agentes estabilizadores.

- Análisis no destructivos

- Cono de penetración dinámica

Los resultados del cono de penetración dinámica están relacionados con el CBR en materiales arenosos en cuanto a la densidad y contenido de humedad *in situ*. Las correlaciones con la Resistencia a la Compresión no confinada en materiales ligeramente cementados han sido desarrolladas. Los resultados del CDP pueden ser utilizados como guías preliminares para obtener el módulo elástico de los materiales del pavimento *in situ*.

- **Análisis del estudio deflectométrico**

El estudio deflectométrico proporciona información confiable de la estructura del pavimento *in situ*. Además para ayudar a la delimitación de las secciones homogéneas. Este método indica el módulo elástico *in situ* de cada capa.

Han sido desarrollados varios métodos para medir la respuesta del pavimento bajo carga, principalmente para usarla como un indicador de la condición estructural y la capacidad de carga de los pavimentos.

Los métodos más usados son la Viga Benkelman y el Falling Weight Deflectometer (FWD). En la figura 5 se observa la medición de deflexiones para evaluar el comportamiento del pavimento bajo carga.

Figura 5. Medición de deflexiones para evaluar comportamiento del pavimento bajo carga



Fuente: Ruta Nacional 15.

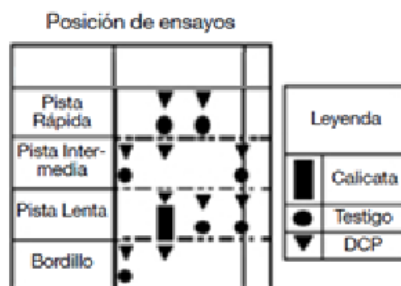
- Medidas de la profundidad del ahuellamiento

Permite evaluar la calidad funcional de la carretera. Generalmente se mide en forma manual. Ahuellamientos angostos indican deterioro superficial del pavimento, mientras que ahuellamientos anchos indican soportes de mala calidad en la capa subyacente.

Una síntesis de todos los datos disponibles deberá elaborarse como se indica en la figura 6.

Figura 6. **Ejemplo de ficha de investigación de detalle**

Tipo de Material	Espesor (cm)		Módulos (MPa)		Resultado de laboratorio		
	Rango	95 %ile	FWD	DCP	CBR	P	Densidad
Asfalto	11-19	13	3.500				
Piedra caliza estabilizada	18.5-22	19	280		102	P	2,36
Piedra caliza triturada	12-19	15	210		110	P	2,29
Piedra caliza Mal estado	In-situ		145	165	59		2,04



Fuente: Wirtgen, Manual de reciclado en frío. 2004. p. 5.

2. LA TECNOLOGÍA DEL ASFALTO ESPUMADO

Este sistema consiste en la disgregación de las capas de pavimento asfáltico y bases granulares subyacentes, incorporando a las mismas cemento asfáltico a alta temperatura, el cual al hacer contacto con una pequeña cantidad de agua fría, explota en miles de burbujas originando así una aglutinación de la fracción fina con los agregados y mejorando por lo tanto la capacidad cohesiva de la mezcla al ser compactada.

2.1. Antecedentes

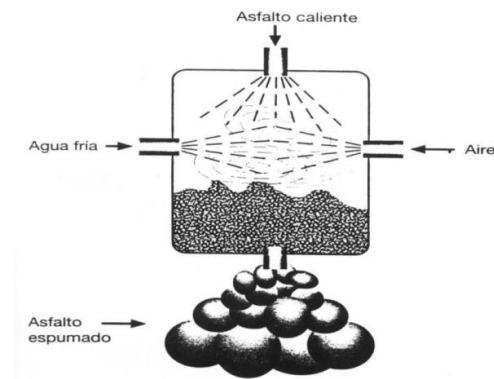
El desarrollo de la tecnología del asfalto espumado, expandido o celular se origina hace más de 40 años en la Universidad de Iowa, Estados Unidos, donde se utilizó por primera vez un proceso de vapor inyectado para formar una espuma. Posteriormente la empresa Mobil Oil de Australia en 1968, mejoró esta tecnología al comprar los derechos de la patente de invención al mezclar agua fría con asfalto para generar la espuma, transformándose en un proceso más económico y con menor riesgo.

El reciclaje en frío *in situ* de pavimentos con asfalto espumado es el proceso mediante el cual se recupera la mayor cantidad de material del pavimento existente, creando una nueva capa homogénea y gruesa, que es reforzada con la adición de asfalto espumado. Se obtiene mediante un proceso en el cual se inyecta agua (1 al 2% en peso del cemento asfáltico) y aire comprimido a una masa de asfalto caliente (160 a 180°C) dentro de una cámara de expansión. En el momento en que se añade agua fría al cemento asfáltico caliente, se eleva la temperatura del agua a 100°C y se produce una

expansión instantánea de vapor debido a la cual el volumen se multiplica de 15 a 20 veces. Las burbujas de vapor son forzadas a introducirse en la fase continua del asfalto. La temperatura de la espuma se reduce, se condensa y provoca el colapso y desintegración de la espuma que produce miles de gotitas de asfalto las cuales al unirse recuperan su volumen inicial sin alterar sus propiedades originales. Para la producción con asfalto espumado el agregado debe ser incorporado mientras el asfalto se encuentra en estado de espuma. Al desintegrarse la burbuja se mezcla con el agregado fino, produciéndose una pasta de asfalto fino que actúa como un mortero que provoca la adhesión del agregado grueso. (Jenkins, et. al., 1999).

En la figura 7 se observa el proceso del asfalto espumado dentro de la cámara de expansión.

Figura 7. **Cámara de expansión**



Fuente: Evaluación y rehabilitación de pavimentos por el método de reciclaje. 2004. p.113.

2.2. Caracterización del asfalto espumado

El asfalto espumado se caracteriza por sus dos propiedades principales:

2.2.1. Razón de Expansión (Ex)

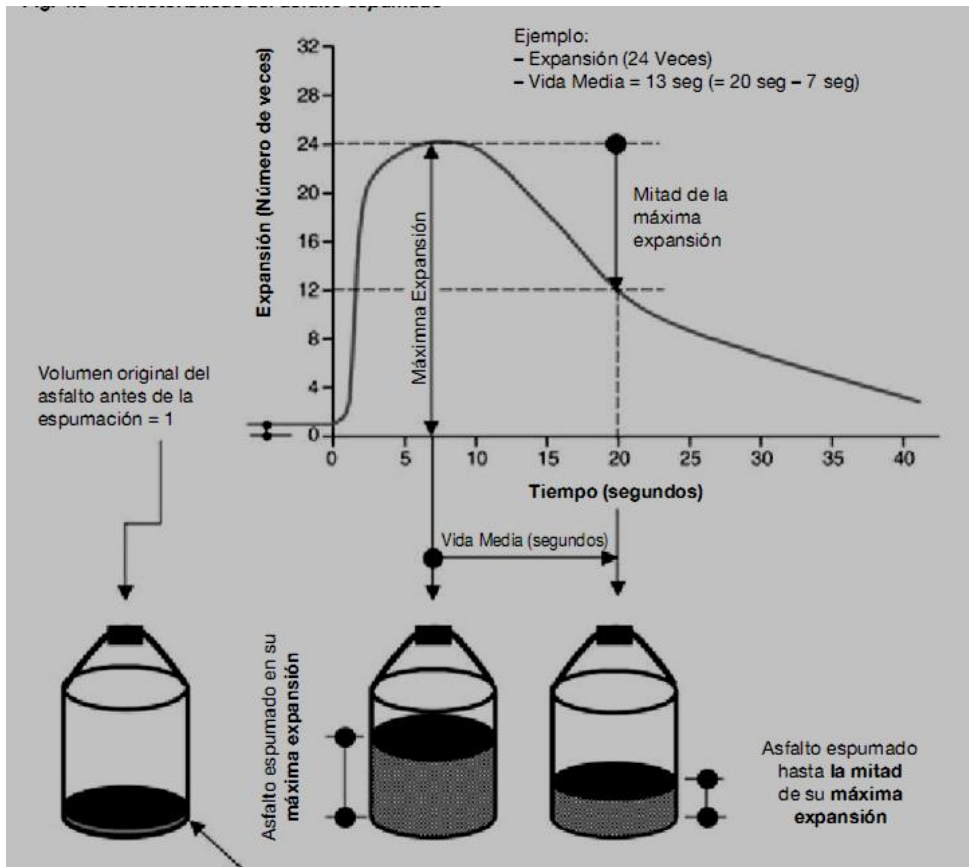
Es la razón entre el volumen de asfalto espumado y el volumen del asfalto original. La razón de expansión indica la trabajabilidad de la espuma y su capacidad de cubrimiento y mezclado con los agregados.

2.2.2. Vida Media (T1/2)

Es el tiempo medido en segundos, que tarda el asfalto en reducir su volumen a la mitad del volumen expandido. La vida media es un indicador de la estabilidad de la espuma y proporciona una idea del tiempo disponible para mezclar el asfalto espumado con los agregados antes de que colapse la espuma.

En la figura 8 se observan las propiedades más importantes del proceso de espumación: la razón de expansión y la vida media del asfalto espumado. Cuando se produce la máxima expansión se observa que su volumen aumenta 24 veces su volumen original en un tiempo de 7 segundos, luego se reduce la mitad de su máxima expansión en 20 segundos, por lo que su tiempo de vida media es el diferencial de estos tiempos, en este caso es de 13 segundos.

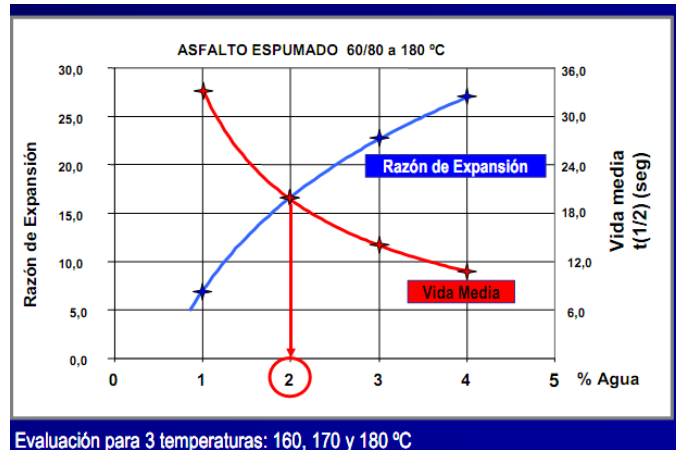
Figura 8. **Propiedades del proceso de espumación**



Fuente: Wirtgen, Manual de reciclado en frío. 2004. p.83.

La razón de expansión y vida media son propiedades que dependen de muchos factores, siendo los principales la temperatura del asfalto y la dosis de agua. Ver figura 9.

Figura 9. Razón de expansión

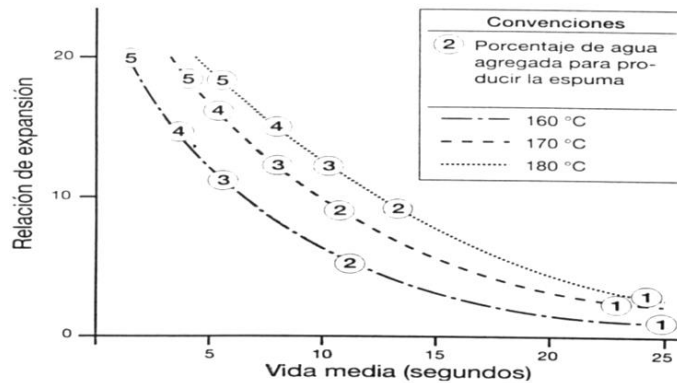


Fuente: Caminos básicos y reciclado de pavimentos con la tecnología del asfalto espumado.

2010. p. 113

A mayores temperaturas de espumado y mayor cantidad de agua se incrementa la razón de expansión, pero a su vez disminuye la vida media; sin embargo el mejor espumado es generalmente considerado como aquel que optimiza tanto la razón de expansión como la vida media. En general, se recomienda una razón de expansión entre 8-15, y al menos 15 segundos de vida media.

Figura 10. Razón de cambio entre la relación de expansión y la vida media



Fuente: Evaluación y rehabilitación de pavimentos por el método de reciclaje. 2004. p.115.

Como se indicó anteriormente, la mejor espuma es la que optimiza la razón de expansión y la vida media. En la gráfica anterior se muestra que una temperatura superior a los 170°C y con un contenido de agua de cerca del 2.5%, producirá una espuma con una relación de expansión de 11 y una vida media de 9 segundos.

La razón de expansión y la vida media está afectado por:

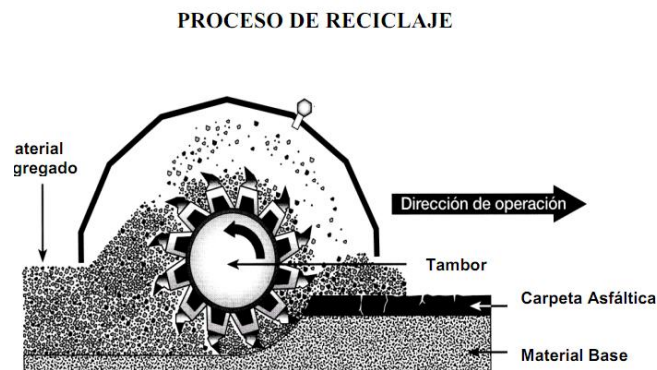
- Adición de agua
- Tipo de asfalto
- Temperatura del asfalto
- Presión de agua y asfalto
- Aditivos

2.3. Reciclado de pavimentos

Aunque la estructura de un pavimento se encuentre deteriorada, no significa que los materiales que la conforman también lo estén. En particular, se considera que el agregado mantiene su edad geológica. Los materiales que forman parte de un pavimento son 100% reciclables.

2.3.1. Proceso del reciclado en frío

Figura 11. Proceso de reciclaje de pavimentos



Fuente: Wirtgen, Manual de reciclado en frío. 2004. p. 30.

El reciclado en frío puede ser realizado en planta o *in situ*.

- Reciclado en planta

El reciclado en planta se obtiene mediante el traslado del material recuperado de un pavimento existente hacia un depósito de acopio central, donde se procesa o se almacena a conveniencia del proyecto. Este proceso se encarece debido al transporte del material, el cual puede ser utilizado en la construcción de un nuevo proyecto y en el refuerzo de un pavimento existente.

- Reciclado *in situ*

Este proceso obtiene los materiales por medio de una máquina recicladora móvil, los cuales son mezclados con cemento, cal, etc. y agregados nuevos si fuese necesario, para formar una base asfáltica que será colocada en el mismo lugar. Actualmente, el reciclado *in situ* es de uso generalizado y realizado por máquinas modernas con relativa facilidad y costos de operación menores que las técnicas tradicionales de rehabilitación.

Estas máquinas son diseñadas para lograr la capacidad de reciclar capas de pavimentos de gran espesor de una sola pasada. Las recicladoras modernas tienden a ser máquinas grandes y potentes, las cuales pueden estar montadas sobre orugas o sobre neumáticos de flotación. El elemento más importante de una máquina recicladora es el rotor fresador-mezclador equipado con un gran número de puntas especialmente diseñadas para este proceso. El tambor rota y pulveriza el material del pavimento existente. 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.

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 como la cal hidratada o cemento son esparcidos en la superficie del pavimento existente, delante de la recicladora, mezclando estos agentes con el material recuperado, para luego inyectarle agua, de una sola vez.

Los trenes de reciclado pueden ser configurados de distinta manera, 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. Ver la figura 11.

Figura 12. **Tren de reciclado en un proyecto de rehabilitación**



Fuente: Ruta Nacional 1.

2.4. **Aplicaciones del reciclado en frío**

El reciclado en frío es un proceso que puede satisfacer con muchas ventajas económicas y energéticas las necesidades de mantenimiento y rehabilitación en la infraestructura vial.

Factores a considerar en la decisión del reciclado

- Cuando los materiales en el lugar del proyecto son escasos, de mala calidad y de poca consistencia.

- Poca accesibilidad a la explotación de los bancos de materiales o grandes distancias de acarreo.

2.4.1. Reciclado del 100% del RAP (Pavimento Asfáltico Recuperado)

Se refiere exclusivamente al reciclado del 100% RAP, es decir, el concreto asfáltico recuperado. RAP significa por sus siglas en inglés Recycled Asphalt Pavement.

2.4.2. Estabilización con RAP/base granular

Este tipo de reciclado es aplicado cuando se requiere rehabilitar estructuras de pavimentos deteriorados (baches, cuero de lagarto, grietas, etc.) y constituidas por bases granulares y superficies asfálticas de concreto asfáltico o tratamientos superficiales. Al adicionarse agentes estabilizadores como cemento o cal durante el reciclado se mejoran las características físicas y mecánicas de los suelos y se mejora la calidad de la superficie de rodadura. La profundidad de la estabilización varía entre 15 y 25 centímetros; sí es necesario mejorar la capacidad estructural del pavimento se puede incrementar la profundidad del espesor del reciclado.

Con el proceso de reciclado se mejora la capacidad estructural del pavimento después de la estabilización e incrementándose esta capacidad con la colocación de la capa de rodadura.

2.4.3. Pulverización

Las capas asfálticas gruesas que presentan un estado de agrietamiento por fatiga severa, se tratan mejor mediante la pulverización previa de la capa asfáltica completa, sin necesidad de agregar ningún agente estabilizador. Al pulverizarse las capas asfálticas se elimina el riesgo de reflejo de las grietas en las capas superiores. La base asfáltica nueva y las capas superficiales se construyen sobre esta capa asfáltica reconstituida obteniéndose una estructura de pavimento “equilibrada”.

2.4.4. Modificación de propiedades mecánicas

Cuando la subrasante de un camino de terracería no reúne las condiciones granulométricas que estén dentro de las especificaciones, es susceptible de mejorarse a través de la adición de materiales de aporte antes de aplicar la técnica del reciclado. El contenido de humedad óptima es importante para alcanzar las densidades máximas de compactación del material reutilizado. La modificación de las propiedades mecánicas puede ser utilizada en el tratamiento de materiales que presenten un elevado índice de plasticidad. En algunos casos, es posible tratar algunos suelos arcillosos con la adición de material arenoso para romper la plasticidad efectiva del material existente.

2.5. Beneficios del reciclado en frío

2.5.1. Ambientales

- Se reduce la explotación de nuevos bancos de materiales y de material de préstamo.
- Se reducen los costos de transporte

- Se minimiza el volumen de material nuevo que tiene que importarse desde las canteras.
- Se usa totalmente el material existente.
- El flujo de transporte es mucho menor. Se reduce el número de vehículos que transportan los materiales, originando un menor daño a la red vial.

2.5.2. Menor tiempo de construcción

- Se reduce el tiempo en el proceso constructivo, debido a las altas tasas de producción y eficiencia de las máquinas recicladoras y el tiempo de interrupciones al tránsito; proporcionando un gran beneficio a los usuarios de la vía.

2.5.3. Seguridad al tránsito

- Los trabajos se realizan sin interrupciones y su apertura al tránsito es casi inmediata, ya que, es posible realizar los trabajos con el tren de reciclado dentro del ancho de un solo carril.

2.5.4. Calidad de la obra

- Se obtiene una excelente calidad de obra con el reciclado en frío, comparada con cualquier estructura de pavimento tradicional y la que se refleja en la vida útil de diseño.
- Las capas recicladas son de un espesor considerable y se trabajan simultáneamente, lo que hace que sean consistentes y homogéneas y no

estén conformadas por delgadas capas ligadas unas con otras, como sucede en los pavimentos tradicionales.

- Se asegura un mezclado consistente y de alta calidad con el agente estabilizador.
- Mejora la capacidad de soporte de la estructura del pavimento.
- Se mantiene la integridad de las capas subyacentes porque la alteración a la estructura de pavimento es mínima comparada con la rehabilitación utilizando técnicas tradicionales.

2.5.5. Relación Costo/Beneficio

- Los beneficios anteriores se combinan para hacer que el reciclaje en frío sea un proceso económico de rehabilitación de pavimentos flexibles.

2.6. Tipos de agentes estabilizadores

En muchas partes donde se llevan a cabo proyectos para la construcción o rehabilitación de carreteras los materiales de buena calidad no están disponibles como se quisiera. Derivado de los altos costos de transporte del material adecuado se ha promovido el desarrollo de técnicas de estabilización para utilizar los recursos localmente disponibles. Las resistencias requeridas por la estructura de pavimento pueden obtenerse de un material local de baja calidad, a través de la adición de pequeñas cantidades de agentes estabilizadores (cementantes, asfálticos, etc.) a un costo relativamente bajo. Estas técnicas son aplicables tanto al reciclado como a proyectos de nuevas construcciones con métodos tradicionalmente utilizados por la industria de la

construcción. A través del suplemento de un agente estabilizador el material recuperado de un pavimento existente puede ser mejorado, eliminándose así la necesidad del acarreo de nuevos materiales.

2.6.1. Tipos de estabilizadores

Estabilizadores cementantes

Los agentes estabilizadores cementantes más utilizados son la cal, el cemento, polímeros y productos derivados del petróleo. La finalidad de estos es ligar las partículas de agregado para incrementar la resistencia de un material, y mejorar la durabilidad y el comportamiento frente al agua y el medio ambiente. Como se ve la función primaria de los agentes estabilizadores es la de aumentar la capacidad soporte. Aparte de los primeros experimentos romanos con cal, el cemento ha sido el más usado por mucho más tiempo. La utilización del tipo de agente estabilizador a utilizar está influenciado por factores tales como: costo, disponibilidad, características del material, políticas.

- Estabilización con cal

La cal es un agente estabilizador más adecuado para materiales con mayor índice de plasticidad. La cal liberada durante el proceso de hidratación reacciona con las partículas arcillosas en los suelos plásticos, reduciendo esta propiedad.

- Estabilización con cemento

El uso de mezclas de cemento puede estar limitado al tratamiento de materiales con índice de plasticidad menor que 10.

Derivado de que el cemento se produce en todos los países del mundo, es el agente estabilizador más comúnmente utilizado. Históricamente ha sido comprobado su alto grado de desempeño como material de construcción al ser utilizado como agente estabilizador en una gran cantidad de kilómetros de pavimentación alrededor del mundo. El objetivo fundamental de la adición de cemento es incrementar la resistencia del material y la resistencia de compresión no confinada (UCS Unconfined Compressive Strength), que se define como el principal criterio de diseño. Además, deben de considerarse otros factores como: la tasa de ganancia en resistencia, la Resistencia a la Tracción Indirecta (ITS Indirect Tensile Strength), el potencial de agrietamiento y la durabilidad.

La resistencia a la compresión y la tracción alcanzada en un material estabilizado con cemento está determinada por la cantidad de cemento que se le adiciona, el tipo de material y la densidad de compactación. La resistencia adquirida está determinada por la cantidad de agente estabilizador agregado y el tipo de material que se está tratando. Contrariamente a la percepción de algunas personas, el adicionarle más cemento para aumentar la resistencia puede ser perjudicial para el desempeño de la capa.

El material tratado con un agente estabilizador cementante tiende a ser relativamente frágil, luego de aumentar la resistencia hace que el material sea aún más frágil con la consecuente reducción en la flexibilidad de la capa estabilizada. Esto lleva inevitablemente a una proliferación de las grietas ante

las cargas repetitivas de tráfico, reduciéndose así el desempeño estructural. Es por esto que es muy importante que el proceso de colocación y compactación sea realizado adecuadamente, de manera de alcanzar la densidad máxima y también obtener las resistencias anticipadas del material compactado.

Agentes estabilizadores asfálticos

El asfalto es un líquido con mucha viscosidad que no es trabajable a la temperatura ambiente. Proporciona la liga o adherencia entre los materiales en la industria de la construcción de caminos. El asfalto utilizado como agente estabilizador ha cobrado popularidad tanto en forma de emulsión como asfalto espumado. Estabilizar con asfalto es una forma efectiva, desde el punto de vista de optimizar los costos, mejorar la resistencia del material y reducir al mismo tiempo los efectos perjudiciales del agua y el medio ambiente. La estabilización asfáltica produce una capa relativamente flexible comparada con el mismo material tratado con cemento.

El material estabilizado con asfalto, con menos del 1.5% en peso de cemento no sufre agrietamiento por retracción y su apertura al tráfico es inmediata.

- Estabilización con emulsión asfáltica

Podemos definir una emulsión asfáltica como una dispersión fina más o menos estabilizada de un líquido en otro, los cuales no pueden mezclarse y están unidos por un emulsificante. Las emulsiones son sistemas formados por dos fases, parcial o totalmente inmiscibles en donde una forma la llamada fase continúa (o dispersante) y la otra fase discreta (o dispersa).

Las emulsiones asfálticas estándar consisten en una fase de asfalto (glóbulos) dispersa en una fase continua de agua.

La mayoría de las emulsiones utilizadas como agentes estabilizadores tienen un componente de “asfalto residual” de 60% que significa que el 60% de volumen de la emulsión está compuesto de asfalto disperso en un 40% del volumen que es agua. El porcentaje de asfalto puede variar entre 30% y 70%, pero los porcentajes de asfaltos mayores que 60% no son recomendables para el reciclado debido a que la emulsión se torna viscosa, más difícil de bombear y por lo tanto más difícil de cubrir el agregado.

Después de mezclar la emulsión con el suelo a estabilizar, se produce el proceso de “quiebre” que es la separación del asfalto de la fase de agua y la unión de las gotitas de asfalto con el agregado, para producir una película continua de asfalto sobre la superficie del agregado. El exceso de agua del agregado se deposita en la mezcla. El lapso de tiempo entre el mezclado hasta la separación del agua de los glóbulos de asfalto, se conoce como el tiempo de “quiebre” (*setting*).

El proceso de quiebre es seguido por el curado, que es la pérdida del agua de la mezcla (a través de la evaporación) y el incremento de la rigidez y la resistencia a la tracción de la capa estabilizada de asfalto. Esto es importante, debido a que una mezcla requiere adquirir rigidez y cohesión entre las partículas antes de permitir el tránsito sobre la nueva capa.

El cemento se utiliza normalmente en conjunto con la emulsión asfáltica. Además de mejorar la resistencia retenida y proveer resistencia mejorada a la humedad, el cemento actúa como una forma de catalizador al controlar el quiebre, incrementando las propiedades resistentes iniciales, ayudando así al

acomodo del tráfico. Las investigaciones realizadas acerca de los efectos de combinar cemento con emulsión asfáltica han demostrado que hasta un 1.5% en masa de cemento puede ser añadido sin reducir significativamente las características de fatiga de la capa estabilizada. Existen tres tipos de emulsión asfáltica las cuales son: aniónica, catiónica y no-iónica.

- Estabilización con asfalto espumado

El asfalto espumado como agente estabilizador puede ser utilizado con una gran variedad de materiales desde agregados bien graduados arenas, gravas, piedras trituradas y RAP hasta gravas de baja calidad con plasticidad relativamente alta. El asfalto espumado también se utiliza para estabilizar suelos de bajo valor soporte y producir bases asfálticas de bajo costo y características similares a una base asfáltica convencional. En este caso, la modalidad más utilizada es la estabilización en sitio, para la que se utiliza el mismo proceso descrito para el reciclado de pavimentos asfálticos *in situ*.

La estabilización para cada tipo de suelo debe ser estudiada de forma particular e independiente, será importante conocer la granulometría, densidad y otras propiedades del suelo para diseñar un tratamiento adecuado. Normalmente se requiere adicionar un porcentaje de cemento portland para incorporar material fino o para aumentar la resistencia final de la mezcla. Los materiales que son pobres en finos no se mezclan en forma adecuada con el asfalto espumado. El porcentaje mínimo de finos requerido es del 5%. Considerando como finos la fracción del material que pasa la malla 0.075 mm (No.200). El material que es deficiente en finos puede ser mejorado mediante la adición del cemento, cal u otro material que pase en un 100% la malla No. 200. Sin embargo debe evitarse una dosificación de cemento superior al 1.5%.

Un porcentaje mayor de cemento tiene un efecto negativo, producto de la pérdida de flexibilidad en la capa estabilizada.

2.7. Consideraciones de construcción para trabajar con asfalto espumado

2.7.1. Seguridad

Debido a las altas temperaturas a las que es sometido el asfalto espumado (160°C) al combinarse con el agua para lograr producir la espuma, es necesario tomar todas las medidas de seguridad y entrenamiento del personal que realizará el proyecto de reciclado.

2.7.2. Temperatura del agregado

Las investigaciones desarrolladas demostraron que el Índice de Espumación (Área bajo la curva obtenida de graficar la razón de expansión y la vida media) y la temperatura del agregado (al momento de producirse la mezcla) son factores importantes en la dispersión¹ obtenida. La calidad de la espuma en el laboratorio es siempre inferior a la de la recicladora, por lo que es importante verificar las propiedades de espumación en el terreno. El trabajo con asfalto espumado no se debería de realizar cuando la temperatura del agregado esté bajo los 10°C. En la tabla I se aprecia la facilidad de dispersión del asfalto espumado.

¹ Dispersión: a diferencia de las mezclas asfálticas en caliente, los materiales estabilizados con asfalto espumado no son negros, debido a que las partículas gruesas del agregado no están cubiertas y usualmente están libres de asfalto.

Tabla I. **Facilidad del asfalto espumado para dispersarse (capacidad de mezclado)**

Índice de espumación	Razón de Expansión (implícito)	Temperatura del agregado (°C)		
		< 15 °C	15 °C a 25 °C	> 25 °C
< 75	< 8	Muy mala	Mala	Moderada
75 a 100	8 a 12	Moderada	Buena	Buena
> 150	> 12	Buena	Muy Buena	Muy Buena

Fuente: Wirtgen, Manual de reciclado en frío. 2004. p. 88.

2.7.3. Consistencia del suministro y presión de asfalto

El camión distribuidor del cemento asfáltico enganchado a la recicladora deberá de suministrar el asfalto con la temperatura correcta, la cual deberá de medirse utilizando un termómetro calibrado; y la calidad de la espumación deberá de verificarse después de que 100 litros hayan circulado por la barra de aplicación de asfalto, mientras se realiza la operación del reciclado.

La calidad de la espuma está directamente relacionada con la presión de operación de la recicladora. A más presión, mayor será el flujo de asfalto que tiende a atomizarse y que pasa a través del surtidor de asfalto a la cámara de expansión, lo cual asegura que las partículas pequeñas de asfalto entrarán en contacto con el agua, la cual también ingresa a la cámara en forma atomizada.

2.7.4 Adición de cemento

Comúnmente se utiliza como agente de estabilización el cemento en un pequeño porcentaje cuando se recicla con asfalto espumado. El cemento puede agregarse disperso sobre la superficie a reciclar o con una unidad

especial para esparcirlo en las cantidades establecidas por el diseño de la mezcla. Este aditivo siempre será agregado en conjunto con el asfalto espumado.

2.8. Propiedades típicas de los materiales estabilizados con asfalto espumado

Cuando se optimiza la aplicación del asfalto espumado, de acuerdo al procedimiento del diseño de mezcla se obtienen las propiedades de ingeniería más importantes aplicables al material estabilizado.

2.8.1. Resistencia

La Resistencia a la Tracción Indirecta (Indirect Tensile Strength, ITS) permite evaluar la resistencia estructural de los materiales estabilizados con asfalto espumado. Ver tabla II.

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

Tipo de material	Probetas de 10 mm Marshall		Probeta 150 mm Proctor
	ITS seco (kPa)	TSR (Razón)	ITS equ (kPa)
RAP/Grava triturada (mezcla 50/50)	250 a 600	0.8 a 1.0	120 a 250
Grava triturada graduada	200 a 500	0.6 a 0.9	120 a 200
Grava natural (IP<10, CBR<30)	150 a 450	0.3 a 0.75	80 a 150

Fuente: Wirtgen, Manual de reciclado en frío. 2004. p. 91.

El ensayo ITS puede ser realizado en muestras elaboradas y curadas de 100 mm o 150 mm. Además, el contenido de humedad del material es generalmente determinada en términos de la Resistencia a la Tracción Retenida (Tensile Strength Retained, TSR), con muestras de 100 mm mediante la siguiente ecuación 1:

$$\text{TSR} = \frac{\text{ITS}_{\text{saturado}}}{\text{ITS}_{\text{seco}}} \quad \text{ecuación(1)}$$

El valor de TSR saturado se obtiene sumergiendo las muestras curadas en agua durante 24 horas antes de realizar el ensayo.

La Resistencia a la Compresión no Confinada (Unconfined Compressive Strength, UCS) se utiliza como un indicador de la capacidad de soporte del

material estabilizado (resistencia a la deformación permanente). Se propone un valor mínimo UCS de 700 KPa para una muestra de 150 mm de diámetro, confeccionada con un esfuerzo de compactación del 100% del Proctor Modificado (curada y ensayada en el contenido óptimo de humedad).

2.8.2 Rigidez

El módulo resiliente de un material es un parámetro representativo de la capacidad de soporte del suelo de la subrasante de una carretera. Es susceptible de ser medido en laboratorio si se somete una muestra a un ensayo de cargas repetidas. Los resultados del ensayo de muestras Marshall de 100 mm de diámetro (curadas y secadas) a tracción indirecta a 10 Hz y 25°C se presentan en la tabla III:

Tabla III. **Rangos de Módulos Resilientes típicos para material estabilizado, ensayados en laboratorio**

Tipo de material	MR (Mpa)
RAP/Grava triturada (mezcla 50/50)	2500 a 4000
Grava granular triturada	2000 a 3000
Grava natural (IP<10, CBR<30)	1500 a 3000

Fuente: Wirtgen, Manual de reciclado en frío. (2004). pag.94

Resultados de laboratorios indican que los valores de Módulo Resiliente para la modelación mecanicista deberían basarse en los resultados de los

ensayos ITS y UCS utilizando probetas de 150 mm, confeccionadas y ensayadas con el contenido óptimo de humedad. Las fórmulas sugeridas para la determinación del Módulo Resiliente (MR en Mpa) se indican en las ecuaciones siguientes:

Fase 1:
$$MR_{\text{Fase 1}} = \frac{(\log (ITS_{\text{equ}}) \times 3950 - 7000) \times TSR \times F_{\text{drenaje}}}{1}$$
 ecuación (2)

Fase 2:
$$MR_{\text{Fase 2}} = \frac{M_{\text{Fase 1}} \times TSR}{(0.5 \times UCS_{\text{equ}}) + 0.7}$$
 ecuación (3)

Fase 1: Rápida pérdida de rigidez ante el tráfico sobre la capa estabilizada

Fase 2: Deformación permanente considerando valores menores de rigidez

Fase 1: Fase de asentamiento. También se denomina “fatiga efectiva”, indica que el agrietamiento producido está asociado a la carga.

Fase 2: Estado de régimen. También se le denomina “estado granular equivalente”, sugiere que los efectos de la estabilización se pierden.

En la tabla IV se observan los valores de los módulos resilientes para materiales estabilizados después de alcanzar el estado de régimen.

Tabla IV. **Módulos Resilientes para material estabilizado después de alcanzar el estado de régimen (Fase 2)**

Tipo de material	Asfalto espumado añadido (%)	Módulo resiliente MRFase2 (Mpa)
100% RAP	1.5 a 2.0	1000 a 2500
RAP/Grava triturada (mezcla 50/50)	2.0 a 2.5	800 a 2000
Grava triturada bien graduada	2.0 a 3.0	600 a 1500
Grava natural (IP<10, CBR>45)	2.0 a 3.5	400 a 800
Grava natural (IP<10, CBR>25)	2.5 a 4.0	300 a 600
Arenas no plásticas	3.0 a 5.0	200 a 500

Fuente: Wirtgen, Manual de reciclado en frío. 2004. p. 94.

3. DISEÑO DE MEZCLAS Y DISEÑO ESTRUCTURAL DE LA REHABILITACIÓN CON ASFALTO ESPUMADO

3.1. Diseño de mezclas

Los diseños de mezclas se realizan con el objetivo de determinar el contenido óptimo de estabilizador (cemento Portland y cemento asfáltico), mezclado con los agregados que permitan obtener las propiedades deseadas.

3.1.1. Diseño de mezclas de agregados con asfalto espumado

El diseño de la mezcla es fundamental en la investigación de los pavimentos y los procedimientos de diseño, y su finalidad es establecer el método más efectivo de tratamiento de los materiales en las capas recicladas. En algunos casos deberá de adicionarse agregado nuevo para mejorar las características físicas y mecánicas del material de aporte, dependiendo de la calidad del material y de las propiedades requeridas en el producto del reciclado final.

3.1.2. Aparatos de laboratorio utilizados para el diseño de mezclas

Para el diseño de las mezclas de los agregados con asfalto espumado se utilizan en el laboratorio los siguientes aparatos:

- Planta portátil de laboratorio

Capaz de producir asfalto espumado a razón de 50 a 200 gramos por segundo (50g/s – 200g/s). El método de producción debe simular de manera muy aproximada el de producción a escala industrial. La planta debe tener un recipiente termostáticamente controlado, capaz de contener una masa de diez kilogramos (10 kg) de asfalto a una temperatura entre 150° C y 205° C, con un margen de $\pm 5^\circ$ C. Debe poseer, además, un dispositivo para el suministro de aire comprimido de baja presión de 0 – 500 kPa, con una precisión de ± 25 kPa. También, debe disponer de un sistema para la adición de agua fría al asfalto caliente, variable de 0% a 4% por masa, con una precisión de $\pm 0.2\%$. Su diseño debe permitir la descarga directa de la espuma elaborada en el tazón de mezcla de un mezclador de laboratorio accionado por electricidad, con una capacidad de cuando menos 10 kg.

- Moldes de compactación Marshall con placa de base y collar de extensión

Estos moldes tienen las dimensiones de 101.6 ± 0.5 mm de diámetro y 87.3 ± 1 mm de altura, con placa de base y collar de extensión. La placa de base y el collar de extensión deberán ser intercambiables, es decir, ajustables en cualquiera de los dos extremos del molde.

- Extractor de probetas

Elemento de acero en forma de disco, con diámetro de 100 mm y 12.7 mm de espesor, utilizado para extraer la probeta compactada del molde, con ayuda del collar de extensión

- Martillo de compactación

Consiste en un dispositivo de acero formado por una base plana circular de 98.5 ± 0.5 mm diámetro y un pisón deslizante de 4536 ± 5 gramos, con una caída libre de 457 ± 3 mm. El martillo de compactación debe estar equipado con un protector de dedos. El empleo de un martillo mecánico es opcional.

- Pedestal de compactación

Consisten en una pieza prismática de madera, de base cuadrada de 203 mm de lado y 457 mm de altura, provista en su cara superior de una platina cuadrada de acero de 305 mm de lado y 25.4 mm de espesor, firmemente sujeta a la misma. La madera será roble u otra clase cuya densidad seca sea de 670 a 770 kg/m³. El conjunto debe fijarse firmemente a una base de concreto debiendo quedar la platina de acero en posición completamente horizontal.

- Soporte para molde

Dispositivo con resorte de tensión, diseñado para centrar rígidamente el molde de compactación sobre el pedestal. Deberá, además, mantener el molde en su posición durante el proceso de compactación de la mezcla.

- Balanza de 5 kg de capacidad

Esta balanza debe de ser con precisión de 1 gramo.

- Espátula con una cuchilla

De aproximadamente 150 mm de longitud.

- Prensa

Con capacidad mínima de carga de 20 kN con una velocidad uniforme de desplazamiento de 50.8 mm por minuto, provista de un medidor de carga de cuando menos 15 kN con una precisión de 0.1 kN.

Recinto termostático

Capaz de mantener una temperatura e $25 \pm 1^\circ \text{C}$.

- Dos bandas de apoyo

De acero endurecido, de 13 ± 0.1 mm de ancho y 70 mm de longitud, con una superficie cóncava con radio de curvatura de 51 ± 1 mm. Los bordes de la superficie de carga deben ser ligeramente redondeados. Las bandas de apoyo deben montarse en un marco de diseño apropiado, que permita su correcta alineación sobre los especímenes de prueba.

- Placa de transferencia de carga, circular o cuadrada

Que permita transferir la carga de la máquina de compresión a las bandas de apoyo sin deformación. Sus dimensiones deben ser tales, que cubran al menos la longitud de la probeta.

- Calibradores

Para medir la longitud y el diámetro de las probetas, con aproximación a los 0.5 mm más cercanos.

- Grasa de silicona o aceite
- Desecador de vacío u otro recipiente apropiado y una bomba de vacío capaz de reducir la presión a menos de 50 mm de mercurio, conectada a un manómetro.
- Termómetro

Con un rango de 0 a 50° C.

3.2. Procedimiento para el diseño de mezclas con asfalto espumado

El procedimiento básico para el diseño de mezclas con asfalto espumado se resume en los siguientes pasos:

- Optimización de las propiedades de la espuma
- Caracterización del agregado
- Determinación del contenido óptimo de la humedad de la mezcla
- Determinación del contenido óptimo de asfalto
- Propiedades mecánicas de las mezclas de asfalto espumado

3.2.1. Optimización de las propiedades de la espuma

El objetivo principal es determinar la temperatura del asfalto y la cantidad de agua a inyectar que optimicen la razón de expansión y la vida media del asfalto espumado. La mejor espuma es la que optimiza tanto la relación de expansión como la vida media del asfalto espumado.

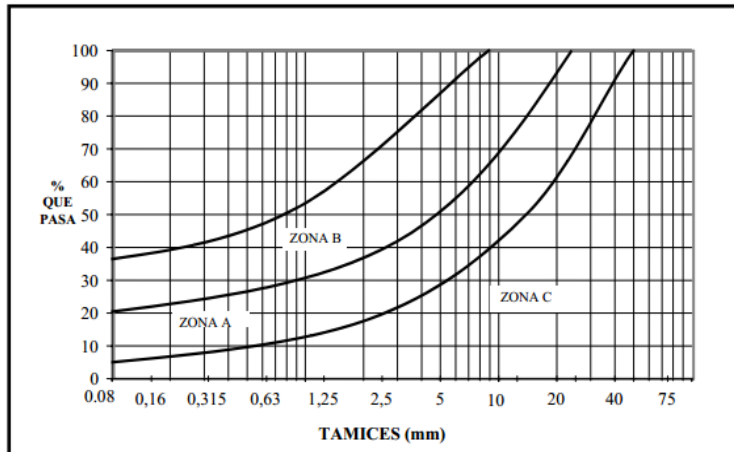
Para llevar a cabo las mediciones en laboratorio de las propiedades de la espuma, se emplea equipo de producción de asfalto espumado, cuya principal característica es poseer una cámara de expansión, idéntica a la empleada en el terreno para producir la espuma de asfalto.

Para ello, se calibran las descargas del flujo de asfalto y agua. La primera se regula a razón de 100 gramos por segundo. La presión de aire se ajusta a 100 kPa. Se mantiene el asfalto a una temperatura entre 180 y 200°C durante 15 minutos, antes de comenzar la producción de espuma. Se requieren cinco (5) muestras de asfalto espumado para producir espuma con contenidos de agua entre 1% y 3%, en incrementos de 0.5%.

Para cada muestra, se permite que la espuma descargue durante 5 segundos en un tambor de acero de 20 litros. Se señala con un marcador el máximo volumen al cual se expande la espuma. Usando un cronómetro, se mide el tiempo en segundos que tarda la espuma en reducir su volumen a la mitad, el cual se define como vida media. Se calcula la relación de expansión del asfalto espumado, dividiendo el volumen máximo de la espuma por el volumen de asfalto en el tambor luego de que la espuma se ha disipado totalmente, pero nunca antes de 60 segundos. Se dibuja una gráfica de relación de expansión y vida media contra el contenido de agua para todas las muestras, en el mismo juego de ejes, lo que permite optimizar el contenido de humedad. Como se indicó en la figura 9 y 10.

3.2.2. Caracterización del agregado

Figura 13. Clasificación de los agregados



Fuente:
Hicks

Akeroyd y

.Clasificación de materiales granulares. 2004. p. 86.

Los agregados que pueden ser mezclados con asfalto espumado, deben ser caracterizados considerando sus dos propiedades: su distribución granulométrica y el índice de plasticidad.

Sí el material se encuentra en la zona A de esta clasificación, es apropiada para ser empleado en carreteras con tráfico pesado, pero puede mejorarse mediante la adición de agregado grueso. Los materiales de la zona B son apropiados para tráfico liviano, pero su comportamiento puede ser mejorado mediante la adición de agregado grueso. Los materiales de la zona C son deficientes en finos y no son apropiados para la estabilización a menos que su graduación sea mejorada mediante la adición de finos (G. Thenoux Z. & A. Jamet A., 2002).

El índice de plasticidad es un indicador de la capacidad que tienen los finos para ser mezclados con el asfalto espumado. El contenido de finos del agregado, es un parámetro fundamental debido a la influencia que tiene en el proceso de dispersión del asfalto y en general debe encontrarse sobre un 5% (Ruckel et al.,1992). La dispersión del asfalto se refiere a que los agregados gruesos en el asfalto espumado no son negros debido a que las partículas gruesas no están cubiertas y usualmente están libres de asfalto. El asfalto sólo se adhiere a las partículas finas para formar un mortero entre las partículas gruesas.

Dependiendo de los valores que alcance éste índice se recomienda el uso de pequeñas cantidades de cemento de acuerdo con la clasificación mostrada en la tabla V (Wirtgen GMBH, 1998).

Tabla V. **Uso de cantidades de cemento dependiendo el índice de plasticidad**

INDICE DE PLASTICIDAD	CANTIDAD DE CEMENTO (%)	CANTIDAD DE CAL (%)
IP<10	1%	
10<IP>16		1
IP>16		2

Fuente: Wirtgen, Manual de Reciclado en Frío. 2004. p. 181.

El contenido de RAP que posea el agregado, también es un factor que influye tanto en las propiedades estructurales de la mezcla como el contenido óptimo de asfalto, por la cual es necesario evaluar esta influencia en el laboratorio.

3.2.3. Determinación del contenido óptimo de humedad de la mezcla

Durante el proceso de mezclado y compactación el contenido de humedad es considerado el criterio de diseño más importante en las mezclas con asfalto espumado debido al efecto lubricante sobre las partículas finas durante la dispersión del asfalto. La relación humedad-densidad debe ser considerada en el diseño de la mezcla (Ruckel et. Al., 1982). Un deficiente cantidad de agua provocará un agregado seco y polvoriento que formará grumos de asfalto al colapsar la espuma y que no se mezcle adecuadamente con la fracción fina de la mezcla. (Bowering, 1970). Al contrario, un exceso de agua incrementará el tiempo de curado, reduciendo la resistencia de la mezcla (Ruckel et. Al., 1982).

Para el diseño se recomienda como contenido óptimo de humedad, el 75% de la humedad óptima de compactación obtenida mediante el ensayo de Proctor Modificado. Las mezclas con bajas densidades son consecuencia de bajos contenidos de humedad, lo que se traduce en una inadecuada dispersión del asfalto espumado (Bowering, 1970).

3.2.4. Determinación del contenido óptimo de asfalto

Para determinar el contenido óptimo del asfalto, deben ser confeccionadas un mínimo de 5 mezclas con distintos contenidos asfálticos (1%-3% de asfalto), y evaluar el comportamiento de cada una de ellas en función de la Tracción Indirecta (o tracción por compresión diametral), determinada tanto en estado seco como saturado. El contenido óptimo de asfalto es aquel que maximiza la tracción indirecta saturada (CSIR Transportek, 1999). La tracción indirecta (en estado seco o saturado), se determina sobre especímenes cilíndricos (100 mm de diámetro por 63.5 mm de espesor) compactadas con 75 golpes con martillo

Marshall. Antes de someter las especímenes al ensayo de tracción indirecta, estas son curadas durante 72 horas en un horno a 40°C. El estado saturado se logra sumergiendo las probetas en agua durante 24 horas a 25°C.

3.2.5. Propiedades mecánicas de las mezclas de asfalto espumado

Las propiedades mecánicas más utilizadas para caracterizar las mezclas de asfalto espumado son: CBR, Tracción Indirecta, Módulo Resiliente, Compresión no Confinada, Estabilidad Marshall y Resistencia a la Fatiga.

Las propiedades mecánicas son susceptibles a la humedad, sin embargo existen ciertos aditivos como la cal o el cemento que reducen esta susceptibilidad (Castedo y Wood, 1983), al igual que elevados contenidos de asfalto, debido principalmente a la reducción de la permeabilidad.

Las mezclas con asfalto espumado disminuyen el valor de sus propiedades mecánicas con el incremento en la temperatura, pero son menos susceptibles que las mezclas asfálticas en caliente. A temperaturas superiores a los 30°C, las mezclas con asfalto espumado poseen un Módulo Resiliente más alto que las mezclas asfálticas en caliente equivalentes (después de 21 días de curado a temperatura ambiente) (Bissada, 1987).

Una gran mayoría de las investigaciones y estudios emplean los parámetros: Tracción Indirecta, Módulo Resiliente y Resistencia a la Fatiga.

3.3. Muestras de materiales utilizadas para el diseño de las mezclas

El método utilizado en la toma de muestras del material que va a ser estabilizado con asfalto espumado es muy importante. Una deficiente recolección de las muestras se traduce en ensayos no representativos que proporcionarán resultados inexactos o erróneos. Para la toma de muestras debe tomarse en consideración los siguientes aspectos: Profundidad del reciclado y las proporciones de capa in situ que será mezclada y conformará la capa compuesta; variabilidad del material en la longitud y profundidad del pavimento existente, deberán realizarse varios diseños de mezcla para considerar esta variación; preparación del material del pavimento existente para la mezcla, las muestras deberán obtenerse con una fresadora para un muestreo asfáltico más representativo.

3.3.1. Tratamiento de los agregados con asfalto espumado

Para el diseño de la mezcla, se deben preparar 5 briquetas de 10 kilogramos cada una, con contenidos de asfalto variables, en incrementos de 1%. La planta portátil de laboratorio se ajusta para producir el asfalto espumado con propiedades óptimas. Si se requiere, se agrega un aditivo mejorador de adherencia para incrementar la adhesión del asfalto al agregado,

Cada porción de 10 kg se mezcla de acuerdo con el siguiente procedimiento:

Se coloca la bacheada entera en el recipiente de mezcla. Se añade suficiente agua, de manera que el contenido de humedad más el contenido de asfalto añadido, sean iguales al contenido óptimo de humedad determinado en el ensayo modificado de compactación. El mezclador mecánico debe ser

colocado de manera que la espuma sea descargada directamente al recipiente de mezcla. Los agregados y el agua se mezclan durante un minuto. Posteriormente, sin parar el mezclador, se descarga la masa requerida de asfalto espumado en el recipiente de mezcla y se continúa el proceso de mezclado durante los siguientes 30 segundos. Se transfiere el agregado tratado con el asfalto espumado a un contenedor sellado. Se repite el procedimiento hasta obtener cinco (5) muestras tratadas con diferentes contenidos de asfalto. Estas muestras se encuentran listas para la ejecución del ensayo.

3.3.2. Contenido de humedad y de asfalto

Se toman muestras de cada bacheada por duplicado, para verificar los contenidos de agua y de asfalto. Se seca cada muestra hasta masa constante a una temperatura de 105 – 110°C, para determinar su humedad. Posteriormente, se realiza una extracción para determinar el contenido de asfalto.

3.3.3. Compactación de las muestras de asfalto espumado

Se limpia el molde, el collar, la placa de base y la base del martillo de compactación. Se coloca un papel de filtro en el fondo del molde. Se pesa una cantidad suficiente de material para que la probeta compactada tenga una altura de 63.6 ± 1.5 mm (usualmente 1150 gramos son suficientes). Se golpea la muestra con la espátula 15 veces por su perímetro y 10 veces en su parte interior, de manera que la superficie quede ligeramente redondeada.

Se compacta la mezcla aplicando 75 golpes del martillo, desde la altura libre establecida. Se remueven el molde y el collar del pedestal, se invierte aquel y se coloca firmemente sobre la placa de base, se ajusta de nuevo el collar y se aplican otros 75 golpes a la nueva superficie superior de la muestra.

3.3.4. Curado

Terminada la compactación, se remueve el molde de la placa de base y se permite el curado de la probeta compactada durante 24 horas dentro de éste a temperatura ambiente.

Se extrae la probeta compactada del molde con ayuda de un gato de extrusión u otro dispositivo adecuado.

3.3.5. Determinación del peso específico aparente de las probetas compactadas

Se determina el peso específico aparente de cada probeta luego de su enfriamiento a temperatura ambiente. Se deben excluir de los ensayos posteriores aquellas probetas cuyo peso específico difiera en más de 30 kg/m^3 del peso específico promedio del grupo al cual pertenecen.

3.3.6. Determinación de la resistencia a la tensión indirecta

Se describe el procedimiento para la preparación y diseño de mezclas de agregados con cemento asfáltico espumado, a partir de la elaboración de muestras o probetas cilíndricas de mezcla, a las cuales se les determina su resistencia a la tensión indirecta.

La prueba de resistencia a la tensión indirecta es utilizada para ensayar probetas con asfalto espumado compactadas y curadas bajo condiciones seca y húmeda. La resistencia a la tensión indirecta se determina midiendo la carga última de falla de una probeta sometida a una tasa de deformación constante de 50.8 mm/minuto sobre su eje diametral.

Las probetas se dejan en reposo a temperatura ambiente durante una noche, antes de ser ensayadas. A continuación, se mide la altura de cada una en cuatro puntos uniformemente espaciados y se calcula su altura promedio en metros (L). Igualmente, se mide su diámetro en metros (D).

Se colocan las probetas en la cámara termostática a una temperatura de $25 \pm 1^\circ\text{C}$ durante un período comprendido de una a dos horas.

Se retira una probeta de la cámara y se coloca en el dispositivo de carga. La posición de la muestra debe ser tal, que las bandas de apoyo estén paralelas y centradas sobre el plano vertical diametral. Se coloca entonces la placa de transferencia sobre la banda superior y se acomoda el conjunto de manera que quede centrado bajo el pistón de carga de la máquina de compresión.

Se aplica carga a la probeta sin impactos a una velocidad de avance de 50.8 mm/minuto hasta alcanzar la máxima carga, registrando esta última (P) con precisión de 0.1 kN.

Con el fin de determinar la resistencia a la tensión indirecta de probetas saturadas, se colocan los especímenes curados en un desecador de vacío donde se cubren con agua a $25 \pm 1^\circ\text{C}$. Se aplica un vacío de 50 mm de mercurio durante 60 ± 1 minutos, contando el tiempo desde el instante en que se ha alcanzado el vacío total. Se remueve la muestra, se seca su superficie y se determina su resistencia a la tensión indirecta mediante el procedimiento descrito con anterioridad.

La resistencia a la tensión indirecta de cada probeta se calcula con la siguiente expresión, debiendo redondearse el resultado al entero de kPa más cercano:

$$RTI = \frac{2P}{\pi LD} \quad \text{ecuación (4)}$$

Siendo:

RTI = resistencia a la tensión indirecta (kPa)

P = máxima carga aplicada (kN)

L = altura de la probeta (m)

D = diámetro de la probeta (m)

3.3.7. Determinación del contenido de asfalto

En esta etapa será analizado el contenido óptimo de asfalto para tres mezclas con distinto contenido de RAP para todas las muestras (tanto las ensayadas en seco como bajo saturación), se dibuja una gráfica que represente el contenido de asfalto (abscisas) contra la resistencia a la tensión indirecta (ordenadas), en el mismo juego de ejes. El contenido de asfalto para el cual alcanzan la máxima resistencia a la tensión las probetas ensayadas bajo saturación es el contenido de asfalto óptimo de la mezcla con asfalto espumado.

Se determina si esta resistencia y la correspondiente en seco para el mismo contenido de asfalto satisfacen las especificaciones. Si no lo hacen, se deberá diseñar una nueva mezcla.

3.4. Diseño estructural de la rehabilitación del pavimento

La vida de un pavimento asfáltico está directamente relacionada con los criterios que se hayan utilizado al momento de diseñar la estructura de pavimento. En esta sección se detallarán parámetros que utiliza la Guía para el Diseño de Estructuras de Pavimento de AASHTO, la cual tiene como base los ensayos del “Road Test” realizados en Ottawa, Illinois por The American Association of State Highway and Transportation Officials.

Este método considera un procedimiento general de diseño aplicable a diferentes condiciones de tránsito y clima. Se basa en la correlación entre el comportamiento observado *in situ* y las mediciones de las propiedades de los materiales que componen la estructura de pavimentos y sus respectivos espesores.

3.4.1. Método AASHTO´93 en el diseño de pavimentos flexibles

Este método considera el concepto de confiabilidad de diseño, que permite al proyectista diseñar un pavimento con un nivel adecuado de riesgo.

Además se introduce el Módulo de Resiliencia en sustitución del CBR de la subrasante como dato de entrada. Esto permite una mejor definición de las propiedades de los materiales. Este concepto puede aplicarse también a materiales estabilizados y no estabilizados.

Las condiciones de drenaje también se toman en cuenta con los coeficientes de drenaje m_i . Estos son función de la calidad del drenaje y el

tiempo que la estructura estará sometida a niveles de humedad próximos a la saturación.

También considera los efectos ambientales, como condiciones de humedad y temperatura.

VARIABLES DE DISEÑO

Las variables de diseño que se deben considerar para un pavimento son:

- Variables de tiempo
- Capacidad soportante de la subrasante
- El Tránsito
- Confiabilidad
- Efectos ambientales

Ecuación de diseño:

La ecuación AASHTO-93 toma la siguiente forma:

$$\log_{10} W_{18} = Z_r S_o + 9.36 \log_{10} (SN + 1) - 0.20 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5} \right]}{\frac{0.40 + 1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \log_{10} M_r - 8.07$$

ecuación (5)

Donde:

W_{18} = El valor ESAL del período de diseño

Z_r = La confiabilidad o probabilidad de que el número de cargas aplicadas no excedan las que el pavimento puede soportar

S_o = La desviación estándar

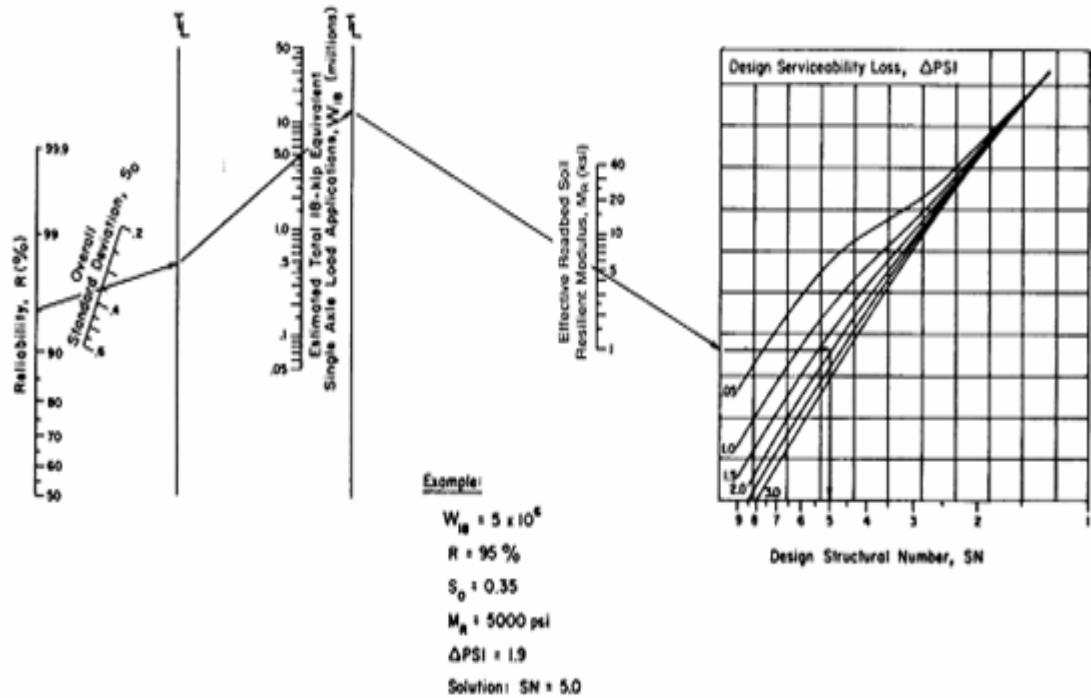
SN= El Número Estructural

Δ PSI= La diferencia entre el Índice de Serviciabilidad

M_r = Módulo de Resiliencia de la subrasante

También los valores de la ecuación de AASHTO '93 pueden calcularse de acuerdo a la figura 14 siguiente:

Figura 14. **Nomograma**



Fuente: Guía para diseño de estructuras de pavimentos de la AASHTO, 1993. p II-32.

3.4.2. **Parámetros de diseño**

Determinación de los ejes equivalentes de diseño

Los pavimentos se diseñan en función del efecto del daño que produce el paso de un eje con una carga para que resistan un determinado número de cargas aplicadas durante su vida útil. Un tránsito mixto está compuesto de vehículos de diferente peso y número de ejes y para efectos de cálculo se les transforma en un número de ejes equivalentes de 80 kN o 18 kips, por lo que se les denominará "Equivalent Standard Axle Load" o ESAL (ejes equivalentes).

- Estudio de los volúmenes de tránsito

Para el diseño de estructuras de pavimentos es necesario conocer el número de vehículos que pasan por un punto dado. Para ello se realizan estudios de volúmenes de tránsito, los cuales pueden variar desde los más amplios en un sistema de caminos, hasta el recuento en lugares específicos tales como: puentes, túneles o intersecciones de carreteras.

Figura 15. **Volumenes de tránsito**

Clasificación	Tipo de vehículo	PESO (TON) (1000 KG)	CARGA (KIPS)	EJES	CARGA (KIPS) EJES	
1	automóviles, paneles y jeep		2	4.41	F	2.2
					T	2.2
2	pick-ups		3.2	7.056	F	2
					T	5
3	camiones medianos (2 ejes)		15.5	34.178	F	12.1
					T	22.1
4	vehículos de (3 ejes)		37	81.59	F	11
					M	35.3
					T	35.3
5	Microbuses		7	15.44	F	5
					T	10
6	Buses		13.6	29.99	F	12
					T	18
7	Vehículos de 4 ejes o más		57	125.7	F	11
					M	35.3
					S	35.3
					R1	22
					R2	22

Fuente: Departamento de Ingeniería de Tránsito de la Dirección General de Caminos. 2010.

Estos aforos se realizan con el objeto de:

- Determinar la composición y volumen de tránsito en un sistema de carreteras.
 - Determinar el número de vehículos que transitan en cierta zona o que circulan dentro de ella.
 - Tráfico promedio diario TPDA.
 - Proyecciones del tráfico futuro.
- Consideraciones para el cálculo de ejes equivalentes.

Las distintas cargas que actúan sobre un pavimento producen a su vez diferentes tensiones y deformaciones en el mismo; los espesores de las capas del pavimento y materiales distintos, responden de diferente manera a igual carga, por consiguiente las fallas son distintas.

Para tomar en cuenta esta diferencia, el volumen de tránsito se transforma en un número de ejes equivalentes de una determinada carga, que a su vez producirá el mismo daño que toda la composición del tránsito mixto de los vehículos. Esta carga uniformizada según AASHTO es de 80 kN o 18 Kips y la conversión se hace a través de los Factores Equivalentes de Carga LEF (Load Equivalent Factor).

- Factor de distribución por dirección

Es el factor total del flujo vehicular aforado en la mayoría de los casos este valor es de 0.5; debido a que la mitad de los vehículos va en una dirección y la otra mitad en la otra dirección.

- Factor de carril

Se define por el carril de diseño aquel que recibe el mayor número de ESAL's. Para un camino de dos carriles, cualquiera de los dos puede ser el carril de diseño, ya que el tránsito por dirección forzosamente se canaliza por ese carril.

El total de ESAL's será afectado por los factores de distribución por dirección y de carril.

Ecuación para calcular el total de ESAL's (tránsito en ejes equivalentes acumulados para un período de diseño) en el carril de diseño:

$$W=WE*FD*FC \quad \text{ecuación (6)}$$

Donde:

WE= Total de ejes equivalentes

FD= Factor de Dirección

F C= Factor de Carril

- Índice de Serviciabilidad

El índice de serviciabilidad de un pavimento, es el valor que indica el grado de confort que tiene la superficie para el desplazamiento de un vehículo. Es la capacidad de un pavimento de servir al tránsito que hace uso de él en un instante determinado, desde el punto de vista del usuario. Un pavimento en perfecto estado se le asigna un valor de serviciabilidad inicial que depende del diseño del pavimento y la calidad de la construcción, cuyo valor normalmente es

de 5 (perfecto); y un pavimento con un índice de serviciabilidad final que se le asigna el valor 0 (pésimas condiciones).

A la diferencia entre estos dos valores se le conoce como la pérdida de serviciabilidad (ΔPSI) o sea el Índice de Serviciabilidad Presente (Presente Serviciability Index). Los valores que se recomiendan dependiendo del tipo de pavimento son los siguientes:

Índice de serviciabilidad inicial: $P_0 = 4.2$

Índice de serviciabilidad final: $P_t = 2.5$ o más para caminos muy importantes
 $P_t = 2.0$ para caminos de tránsito menor.

El factor Equivalente de carga (LEF), es el valor numérico que expresa la relación entre la pérdida de serviciabilidad causada por la carga de un tipo de eje de 80 kN y la producida por un eje estándar en el mismo eje.

$$LEF = \frac{\text{No.deESAL's de 80 kN que producen una pérdida de serviciabilidad}}{\text{No.de ejes equivalentes de 80 kN que producen la misma pérdida de serviciabilidad.}}$$

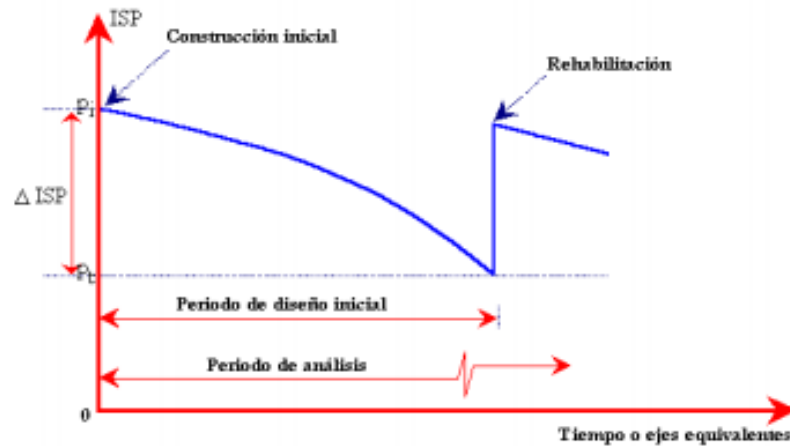
ecuación (7)

Como cada tipo de pavimento responde de manera diferente a una carga, los LEFs también cambian en función del pavimento. El LEF cambia según el SN (structural number, número estructural).

En la figura 16 se aprecia el índice de serviciabilidad inicial P_i que significa que el pavimento es nuevo y el P_t que es el índice de serviciabilidad final que indica que este el momento cuando el pavimento requiere de rehabilitación para prolongar su vida útil. Se puede apreciar que durante el período de análisis se

pueden considerar varias rehabilitaciones, en tanto que, en el período de diseño es cuando el pavimento requiere ser rehabilitado.

Figura 16. Índice de serviciabilidad P_i y P_t



Fuente: Guía para el Diseño de Estructuras de pavimentos de la AASHTO. 1993. p. I-37

- Confiabilidad (R)

La confiabilidad en el diseño representa la probabilidad de que la estructura de pavimento cumpla satisfactoriamente la función prevista bajo la sollicitación de las cargas del tránsito y las condiciones medio ambientales propias de la zona del proyecto durante el período de diseño. El grado de confiabilidad se controla por el factor Z_r , que es un valor asociado al nivel de confianza de la distribución normal Z_r .

Figura 17. **Nivel de confiabilidad según funcionalidad**

Clasificación funcional por tipo de vía	Nivel de confiabilidad (R)	
	Urbano	Rural
Autopistas	85-99.9	80-99.9
Arterias principales	80-99	75-95
Vías colectoras	80-95	75-95
Caminos locales	50-80	50-80

Fuente: Guía para el diseño de estructuras de pavimentos de la AASHTO. 1993. p. II-9.

Para efectos de diseño debe de quedar claro que a medida que el valor de confiabilidad se hace más grande, serán necesarios mayores espesores de pavimento.

- Desviación respecto al promedio (Z_r)

Es el desplazamiento de las abcisas respecto al promedio para que la curva de distribución normal logarítmica cubra un área correspondiente a la confiabilidad R seleccionada.

Se hace la observación de que para confiabilidades mayores del 50% en una distribución normal logarítmica el valor de Z_r es negativo.

Tabla VI. **Valores de ZR en la curva normal para diversos grados de confiabilidad**

Confiabilidad (R)	Valor de ZR
50	- 0,000
60	- 0,253
70	- 0,524
75	- 0,674
80	- 0,841
85	- 1,037
90	- 1,282
91	- 1,340
92	- 1,405
93	- 1,476
94	- 1,555
95	- 1,645
96	- 1,751
97	- 1,881
98	- 2,054
99	- 2,327
99,9	- 3,090
99,99	- 3,750

Fuente:Guía de diseño de estructuras de pavimentos de la AASHTO. 1993. p. I-62.

- **Desviación Estándar (S_0)**

El valor de S_0 incluye las dispersiones inherentes a todos los factores que influyen en el comportamiento del pavimento, determinado principalmente por el tránsito y la variación de suelos.

Es la desviación estándar del conjunto de variables consideradas en el método de diseño. Involucra la variabilidad en las proyecciones de tránsito, la determinación de los ejes equivalentes, la variabilidad de los módulos de capa y de subrasante. Para pavimentos flexibles el valor de S_0 es de 0.40-0.50.

- Coeficiente de drenaje AASHTO

El efecto del agua sobre los pavimentos afecta a la seguridad de los usuarios por la pérdida de adherencia entre el neumático y el pavimento, además de la proyección de agua hacia atrás. Estructuralmente se produce una disminución de la capacidad de soporte, producido principalmente por el empuje hidrostático y el aumento de la presión de poros, los que resultan en una disminución de la fricción interna.

El drenaje del pavimento es evaluado por medio del tiempo que demora la estructura en drenar el agua libre, a partir de un estado de humedad dado. El tiempo que la estructura permanece en un estado con humedad cercana a la saturación, depende de los siguientes factores:

- Tipo de Material
- Permeabilidad de Base
- Pendiente Transversal
- Existencia de Relleno
- Existencia o no de sistemas de drenaje insertos en la base.
- Distancia a la que se encuentran los puntos de evacuación.

De acuerdo a AASHTO, la calidad del drenaje es función del tiempo que demora una base o subbase saturada, en evacuar el 50% del agua.

Para el diseño de pavimentos es necesario adoptar un valor de coeficiente m_i , los que se deben determinar para cada una de las distintas capas que componen el pavimento.

Los coeficientes de drenaje son: valores menores, iguales o mayores a la unidad, esto depende de la calidad filtrante de las capas de drenaje; al tener capas de drenaje con valores mayores que la unidad, entonces es factible la posibilidad de diseñar paquetes estructurales con espesores menores; en el caso que el drenaje no es bueno, el coeficiente es menor que la unidad lo que obligará a diseñar un paquete estructural con mayor espesor, que permita resistir en igualdad de condiciones el tránsito para el que fue diseñado; un mayor espesor del paquete estructural, no garantiza el tener un buen drenaje.

No depende de las características de las capas sino de la precipitación pluvial en el área del proyecto y la proporción anual en donde las capas del pavimento están sujetas a condiciones de saturación.

- Módulo Resiliente (M_r)

El módulo resiliente de la subrasante se define como aquel que relaciona las tensiones aplicadas y las deformaciones recuperables (AASHTO 1993).

El M_r representativo de la subrasante, definido mediante el análisis bicapa de deflexiones, es casi independiente de la estructura superior del pavimento y corresponde al módulo elástico del suelo después de haber sido sometidos a cargas cíclicas.

El método de diseño de estructuras de pavimentos propuesto por AASHTO, incorpora el módulo resiliente como parámetro representativo de la capacidad de soporte del suelo de fundación del camino. Para el desarrollo del modelo de comportamiento de los pavimentos flexibles, la prueba AASHTO definió el módulo resiliente (M_r) mediante la ejecución de ensayos triaxiales

dinámicos con cargas repetidas, por lo cual la guía de diseño recomienda este método para determinar esta propiedad (AASHTO T-294).

La parte fundamental para caracterizar debidamente a los materiales, consiste en la obtención del módulo de resiliencia, con base en pruebas de laboratorio, realizadas en materiales a utilizar en la capa de subrasante con muestras representativas (esfuerzo y humedad) que simulen las estaciones del año respectivas. El módulo de resiliencia “Estacional” será obtenido alternativamente por correlaciones con propiedades del suelo, tales como el contenido de arcilla, humedad, índice plástico, etc.

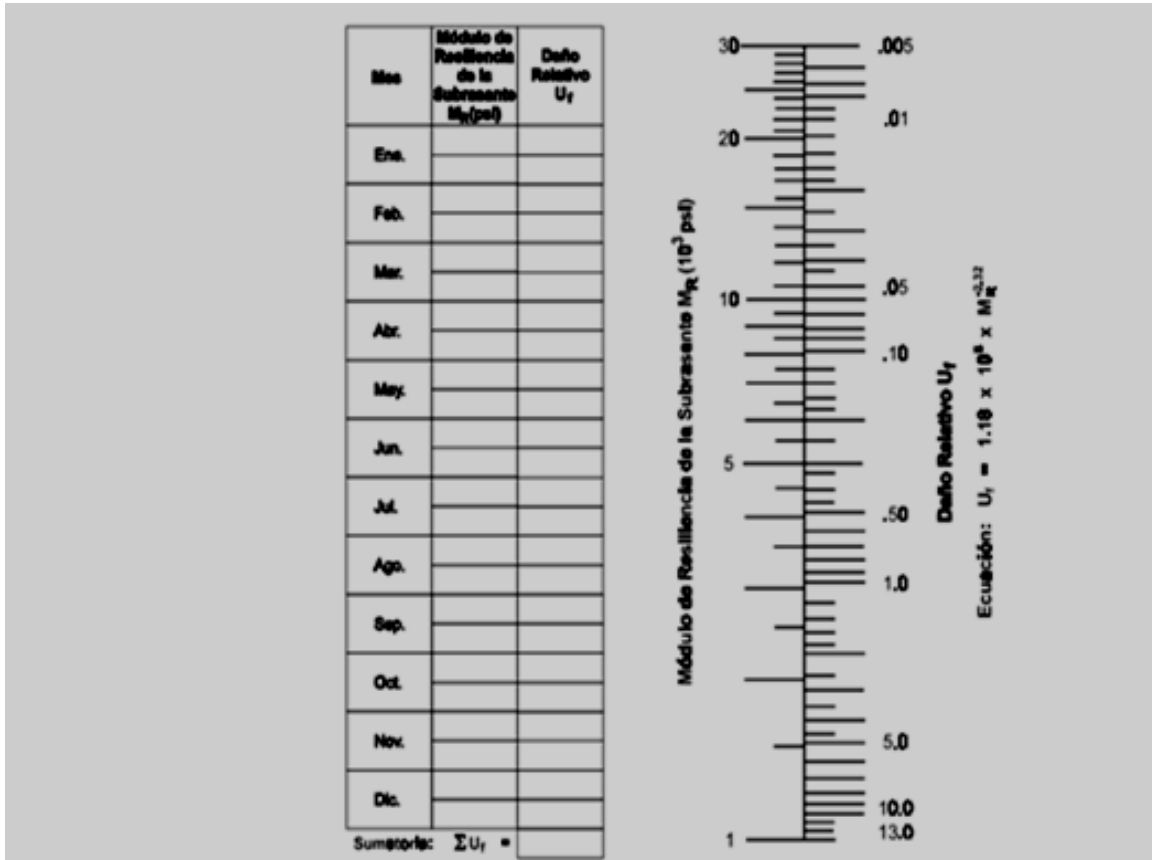
Finalmente, deberá obtenerse un “Módulo de Resiliencia Efectivo”, que es equivalente al efecto combinado de todos los valores estacionales.

Para la obtención del módulo estacional o variaciones del M_r a lo largo de todas las estaciones se puede realizar por dos procedimientos:

- Obteniendo la relación en el laboratorio entre módulo de resiliencia y el contenido de humedad de diferentes muestras en diferentes estaciones del año.
- Utilizando equipo para medición de deflexiones sobre carreteras en servicio durante diferentes estaciones del año.

Para el diseño de pavimentos flexibles, únicamente se recomienda convertir los datos estacionales en módulo de resiliencia efectivo de la capa de subrasante, con el auxiliar de la figura, que proporciona un valor sopesado en función del “daño equivalente anual” obtenido para cada estación en particular.

Figura 18. Formato para calcular el módulo de resiliencia efectivo de la subrasante en pavimentos flexibles



Fuente: Guía para el diseño de estructuras de pavimentos de la AASHTO. 1993. p. II-14

También puede utilizarse la siguiente ecuación:

$$U_f = 1.18 \cdot 10^8 \cdot M_R^{-2.32} \quad \text{ecuación (8)}$$

U_f = Daño relativo en cada estación (quincena o mes)

M_R = Módulo de Resiliencia de la capa de subrasante, obtenido en laboratorio o con deflexiones cada quincena o mes.

Y por último:

$$\bar{U}f = \text{promedio de daño relativo} = \sum Uf/n \quad \text{ecuación (9)}$$

Por lo que el M_R efectivo será el que corresponda al Uf promedio.

Sí no se pueden realizar ensayos para la determinación del Módulo resiliente, se puede correlacionarlo con el CBR mediante la aplicación de la fórmula 3.6:

$$M_r = 2555(\text{CBR})^{0.64} \quad \text{ecuación (10)}$$

- Número Estructural efectivo

El número estructural efectivo representa la capacidad estructural del pavimento para resistir las solicitaciones impuestas por el tránsito.

Una vez obtenido el número estructural SN para la sección estructural del pavimento, utilizando el gráfico o la ecuación general básica de diseño, donde se involucraron los parámetros (tránsito, R, S_0 , M_R , ΔPSI), se requiere ahora determinar la sección multicapa.

Una sección multicapa que en conjunto provea suficiente capacidad de soporte equivalente al número estructural de diseño original. Esta ecuación puede utilizarse para obtener los espesores de capa, (carpeta, base y subbase).

$$SN = a_1 * D_1 + a_2 * D_2 + a_3 * D_3 * m_3 \quad \text{ecuación (11)}$$

Donde:

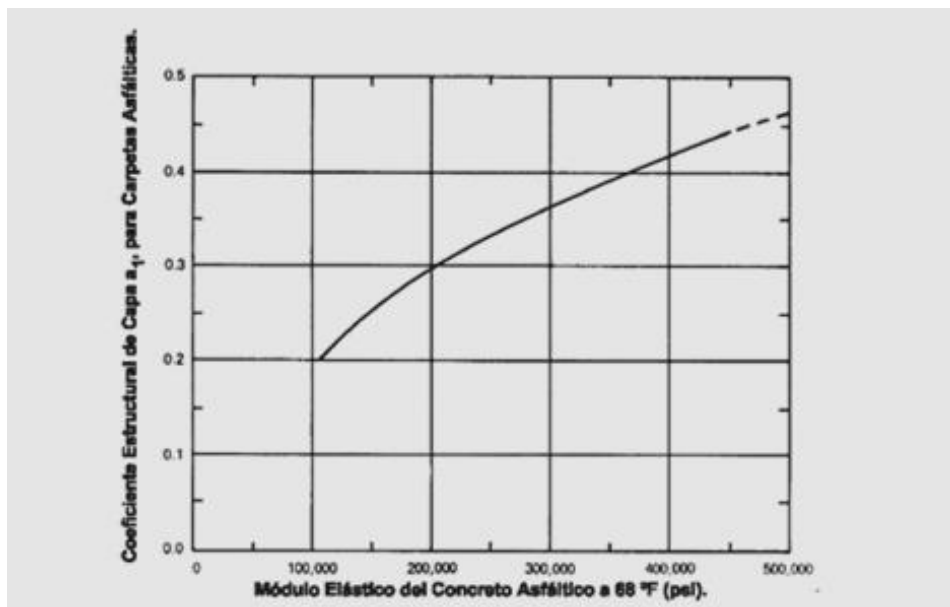
a_1 , a_2 y a_3 = coeficientes de cada capa representativos de carpeta, base y subbase respectivamente.

D_1 , D_2 y D_3 = espesor de la carpeta, base y subbase respectivamente en pulgadas.

m_2 y m_3 = coeficientes de drenaje para base y subbase, respectivamente.

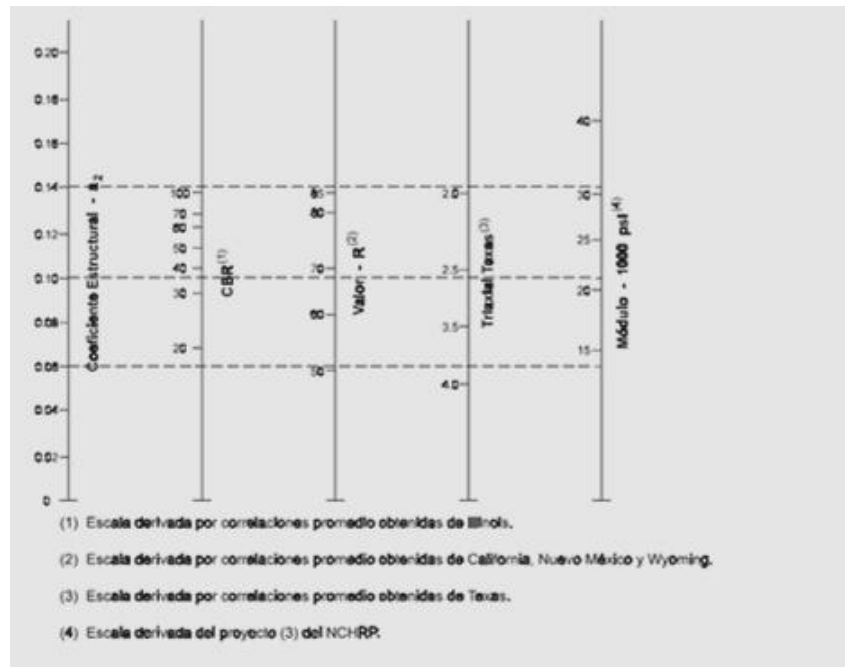
Para la obtención de los coeficientes de capa deberán utilizarse las figuras siguientes, en donde se representan valores de correlaciones hasta de cinco diferentes pruebas de laboratorio: Módulo Elástico, Texas Triaxial, CBR y Estabilidad Marshall.

Figura 19. **Coefficientes de capa para carpeta asfáltica a1**



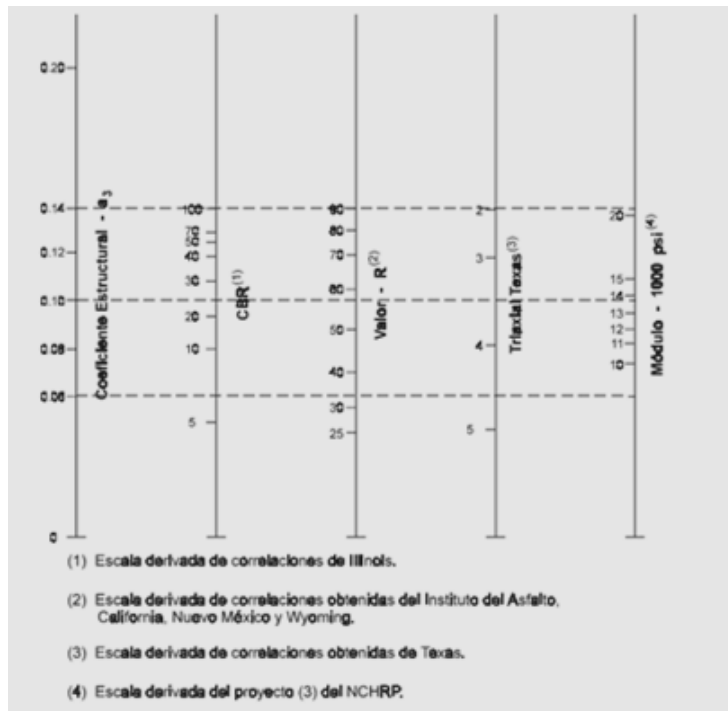
Fuente: Guía para el diseño de estructuras de pavimentos de la AASHTO. 1993. p. II-18

Figura 20. **Coefficientes de capa para variación de los coeficientes de capa a2, en bases granulares**



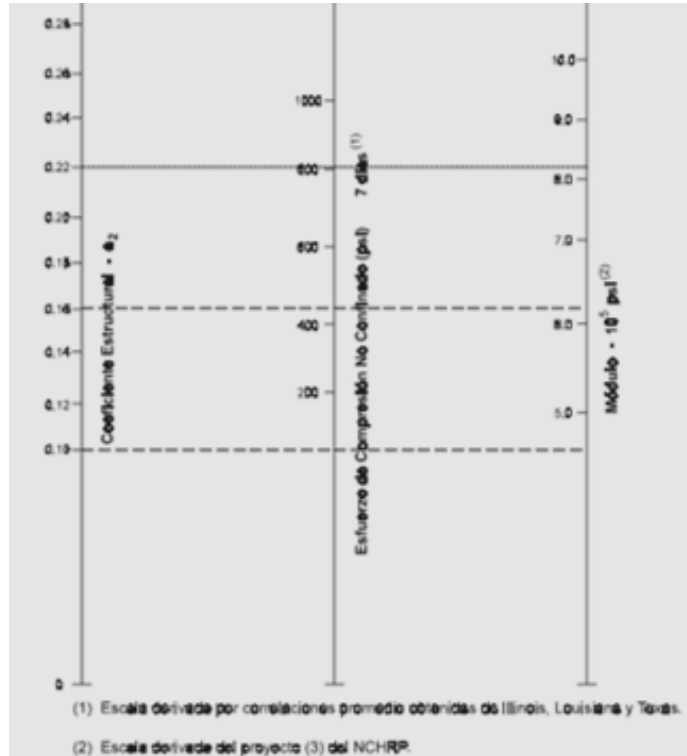
Fuente: Guía para el diseño de estructuras de pavimentos de la AASHTO. 1993. p. II-19

Figura 21. Variación de los coeficientes de capa a3 en subbases granulares



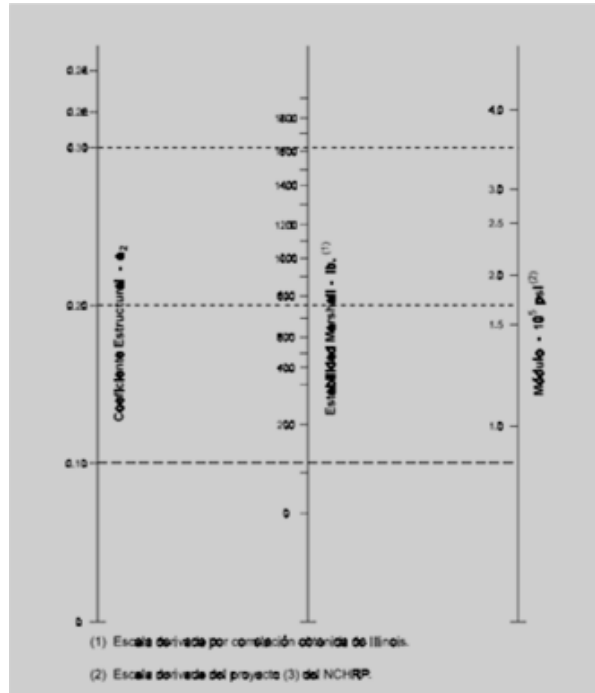
Fuente: Guía para el diseño de estructuras de pavimentos de la AASHTO. 1993. p. II-21

Figura 22. Variación de los coeficientes de capa a2, en bases estabilizadas con cemento



Fuente: Guía para el diseño de estructuras de pavimentos de la AASHTO. 1993. p. II-23.

Figura 23. Variación de los coeficientes de capa a2, en bases estabilizadas con asfalto



Fuente: Guía de diseño de estructuras de pavimentos de la AASHTO. 1993. p. II-24.

Coeficiente estructural

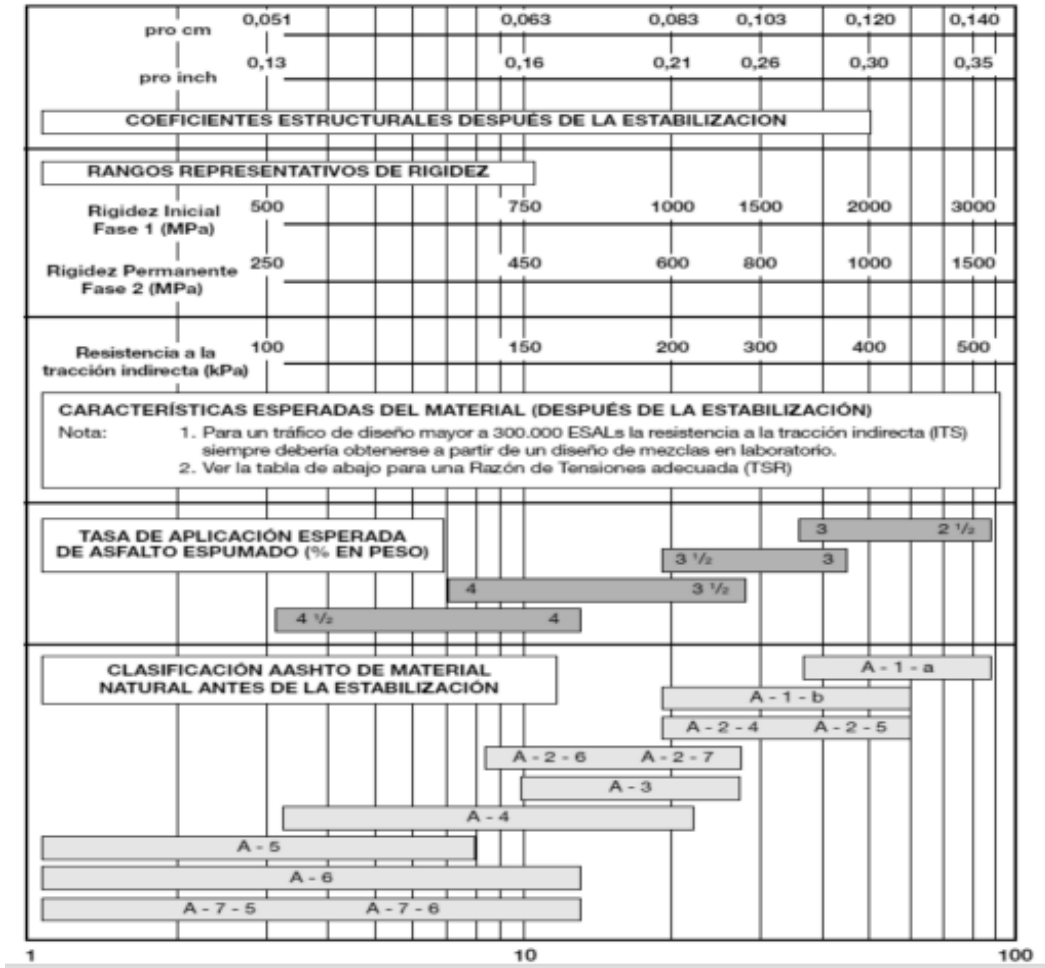
La versión del método AASHTO enfatiza la conveniencia de asignar el coeficiente estructural adecuado a cada capa de pavimento. Los coeficientes estructurales dependen directamente del módulo elástico del material que compone la capa. Los coeficientes han sido desarrollados para ciertos materiales de pavimentos para ser utilizados en el diseño, como los que se muestran a continuación:

Tabla VII. **Coefficiente estructural según el material**

CAPA	COEFICIENTE ESTRUCTURAL
Sub base granular	0.12
Base granular	0.13
Base asfáltica graduación gruesa	0.33
Base asfáltica graduación abierta	0.28
Grava-emulsión	0.30
Concreto asfáltico capa intermedia	0.41
Concreto asfáltico de superficie	0.43
Mezclas drenantes	0.32
Mezcla SMA	0.43

Fuente: elaboración propia.

Figura 24. **Coficiente estimados sugeridos para materiales estabilizados con asfalto espumado**



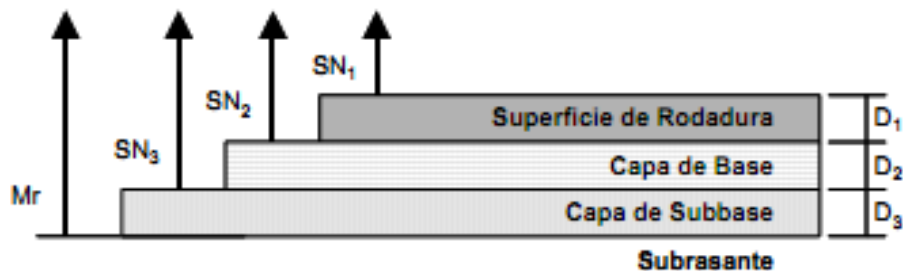
Fuente: Wirtgen. Manual de reciclado en frío. 2004. p 201.

Luego de la evaluación del pavimento existente y tomando en consideración las variables de diseño del pavimento; se procederá a calcular el Número Estructural requerido (SN) y al dimensionamiento de espesores de acuerdo al período de diseño requerido.

Como se indicó anteriormente, para el método de AASHTO'93, se aplica la fórmula General de diseño.

Luego de calculados los valores de SN para cada capa del paquete estructural se procederá a determinar cada uno de los espesores de capa de acuerdo a lo indicado en AASHTO 93 de la siguiente manera:

Figura 25. **Procedimiento para determinar el espesor**



Fuente: Guía de diseño de estructuras de pavimento de la AASHTO. (1993). p. II-36.

Utilizando ecuaciones de coeficientes estructurales, páginas II-20 y II-22 del Manual de diseño de pavimentos de la AASHTO y utilizando equivalencia a unidades/cm se determinarán los coeficientes estructurales de la capa de base y de subbase, como se indica en las fórmulas a continuación respectivamente.

$$a_2 = 0.249 (\log Mr) - 0.977 \quad \text{ecuación (12)}$$

$$a_3 = 0.227 (\log Mr) - 0.839 \quad \text{ecuación (13)}$$

Donde:

Mr= Módulo de resiliencia

Como se indicó en la ecuación 12, la correlación entre Mr y CBR es:

$$Mr = 2,555 * (CBR)^{0.64} \quad \text{ecuación (14)}$$

Resolviendo las ecuaciones de diseño página 2-32 parte II, figura. 3.1, calcular el SN sobre la capa de base, subbase y sobre la subrasante.

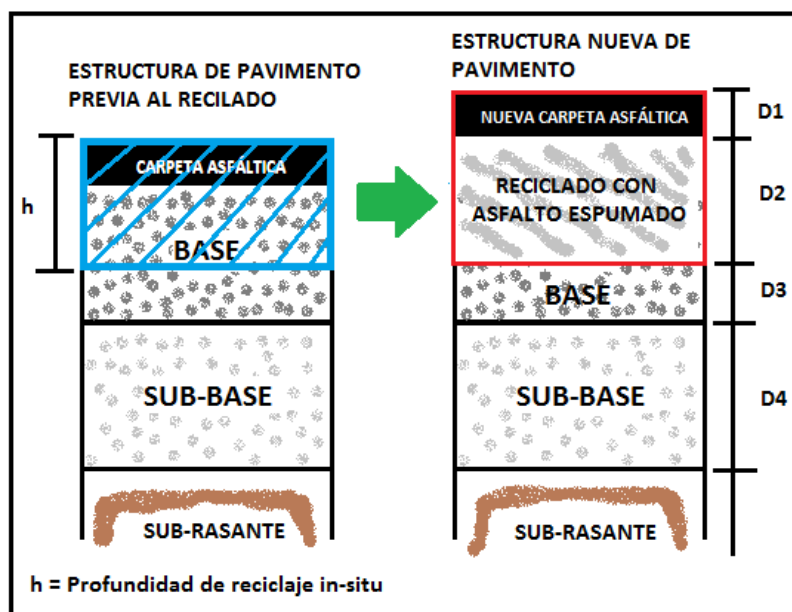
$$D1 > SN1/a1 \quad SN^*1 = a1 * D1 > SN1 \quad \text{ecuación (15)}$$

$$D2 > SN2 - SN^*1/a2 * m2 \quad SN^*1 + SN^*2 > SN2 \quad \text{ecuación (16)}$$

$$D3 > SN3 - (SN^*1 + SN^*2)/a3 * m3 \quad \text{ecuación (17)}$$

Determinación del SN para un pavimento asfáltico donde se utilice la alternativa de rehabilitación con asfalto espumado:

Figura 26. **Procedimiento para determinar el espesor del pavimento con asfalto espumado**



Fuente: elaboración propia.

Fórmula para obtener el SN de un pavimento con asfalto espumado:

$$SN=D1*a1+D2*a2*m2+D3*a3*m3+D4*a4m4 \quad \text{ecuación (18)}$$

El SN está constituido por los diferentes espesores de capa del pavimento como son:

- La carpeta de rodadura
- La capa de asfalto espumado
- La capa de base remanente
- La capa de subbase.

Cuando el espesor de la capa de base remanente es despreciable se considera como parte de la capa de la subbase y se aplican las ecuaciones como se indicó anteriormente.

Luego de determinada la sumatoria de cada uno de los valores del número estructural para cada uno de los espesores de capa se compara contra el número estructural que se obtiene de la ecuación general de diseño para cada capa de la estructura del pavimento.

3.5. Protocolo del Reciclado en frío *in situ* con asfalto espumado

Después de analizadas las fases de que consta un proyecto de rehabilitación de reciclado en frío con asfalto espumado se puede determinar que el protocolo de Ingeniería para su ejecución se podría definir de la siguiente forma:

Figura 27. Protocolo del reciclado en frío *in situ* con asfalto espumado



Fuente: Caminos básicos y reciclado de pavimentos con la tecnología del asfalto espumado. 2010. p. 47.

4. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL RECICLADO EN FRÍO IN SITU DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS CON ASFALTO ESPUMADO

4.1. Definición

Reciclado en frío *in situ* de pavimentos asfálticos con asfalto espumado. Es la operación de remoción y/o recuperación de la carpeta existente y de la recuperación total o parcial de la base subyacente, sí así se especifica en las Disposiciones Especiales, a la profundidad máxima indicada en los planos o conforme lo autorice el Delegado Residente, mezclando los materiales provenientes del fresado y aportando material nuevo -sí es necesario- con cemento asfáltico a la temperatura requerida, agua y un agente estabilizador como agregado fino, mediante una fresadora-recicladora especial para formar el asfalto espumado y luego la mezcla resultante de este proceso, colocarla, tenderla, conformarla y compactarla para proporcionar una superficie uniforme de conformidad con las elevaciones y pendientes longitudinales y transversales establecidas en los planos y en las Disposiciones Especiales.

En los planos de sección típica de pavimentación, se deberá indicar el año base utilizado para el diseño del pavimento, el período de diseño, el total de ejes equivalentes de 80 kN (ESAL) en el carril de diseño durante el período correspondiente, los espesores de la capa de reciclado y tipo de cemento asfáltico.

4.2. Descripción

Este trabajo consiste en la construcción de mezclas asfálticas recicladas y estabilizadas las cuales se obtienen del tratamiento con asfalto espumado que se realiza al material obtenido del proceso de pulverización de un pavimento existente mediante los equipos especializados que se utilizan para este tipo de trabajos de conformidad con lo establecido en la presente sección.

4.3. Materiales

4.3.1. Requisitos de los materiales

- Agregados del reciclaje

Los agregados pétreos serán los resultantes de la pulverización mecánica de las capas de pavimento en el espesor indicado en planos y ajustado por el Delegado Residente cuando sea necesario. La granulometría será definida en los estudios geotécnicos propuestos por el Contratista y aprobados por el Delegado Residente en función de los materiales existentes a reciclar; en caso contrario la granulometría será la indicada en la tabla siguiente:

Tabla VIII. **Reciclaje de pavimento asfaltico *in situ* con asfalto espumado**

Tamiz		Porcentaje que pasa
mm	U.S. Standard	
37. 5 mm	1 1/2"	100
25. 0 mm	1"	75-100
19. 0 mm	3/4"	65-100
9.5 mm	3/8"	45-75
4.7 5 mm	No. 4	30-60
2.0 0 mm	No. 10	25-45
425 µm	No. 40	10-30
75 µm	No. 200	5-20

Fuente: especificaciones técnicas reciclado en frío alcaldía mayor de Bogota, IDU. 2005 .p. 165.

En caso de requerirse mejorar la granulometría, ajustarse la rasante o conformarse la geometría transversal del pavimento existente, se podrá considerar el aporte de materiales de préstamo. Dicho material corresponderá a agregados granulares o triturados provenientes de bancos de materiales debidamente autorizados por la el Delegado Residente y deberán cumplir con

las características de material de base granular o de subbase granular (Sección 304) de las Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes de la D.G.C. Se recomienda que el agregado de adición tenga características mineralógicas similares a las del agregado que se recicla, con el fin de evitar la incompatibilidad química del asfalto con cada uno de los componentes.

La verificación de la compatibilidad química del agregado de aporte, el existente y el asfalto será responsabilidad del Contratista.

El producto del porcentaje que pasa el tamiz No. 200 del agregado combinado por su índice de plasticidad, no podrá ser mayor de setenta y dos (72).

$$\% \text{Pasa tamiz No. 200} \times \text{IP} \leq 72$$

En caso contrario, se deberá realizar un pre-tratamiento con cal o cemento cuyo diseño será presentado por el Contratista

- Agentes estabilizadores

Para obtener una mejora de las características granulométricas y de resistencia inicial del material reciclado se podrá adicionar agentes estabilizadores tales como cemento, cal u otro material inerte de origen calizo, libre de materia orgánica y partículas de arcilla, autorizado por el Delegado Residente. Se permitirá el uso de cemento a granel o en sacos.

- Asfalto

Para la producción de asfalto espumado deberá de emplearse cemento asfáltico de penetración 85-100, compatible con los agregados pétreos, el cual deberá cumplir con los requisitos de la sección tabla 402-1 de la sección 400 de las Especificaciones Generales de Construcción para Carreteras y Puentes de la DGC, 2002.

El cemento asfáltico a utilizar deberá ser capaz de producir una espuma cuya vida media sea superior a 10 segundos y una razón de expansión superior a 10 veces, y cumplir con lo descrito en la sección 401 Pavimento de concreto asfáltico en caliente, de las Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes de la D.G.C. La razón de expansión corresponderá a la relación entre el volumen máximo alcanzado en el estado de espuma y el volumen de asfalto sin espumar. La vida media corresponderá al tiempo transcurrido, en segundos, que tarda la espuma en sedimentarse hasta la mitad del volumen máximo obtenido. El volumen donde se realicen estas mediciones deberá ser de latón con una capacidad de 20 litros y un diámetro de 27 cm.

- Agua

El agua a emplear para la producción de espuma deberá cumplir con los requisitos químicos básicos establecidos en la sección 551.04 inciso d).

4.4. Composición de la mezcla (diseño de la fórmula de trabajo)

El procedimiento para dosificar las mezclas con asfalto espumado (Diseño de la fórmula de trabajo), y que deberá cumplir con todas las exigencias establecidas en esta Sección. Esta fórmula de trabajo deberá ser propuesta por

el Contratista y aprobado por el Delegado Residente, el que será realizado a costo del contratista por un laboratorio que disponga de personal calificado, infraestructura y equipos que permitan simular en el laboratorio el proceso de espumado de campo.

Por cada sección homogénea de material a reciclar el Contratista deberá presentar la dosificación de la mezcla con asfalto espumado para su aprobación al Delegado Residente, previo a la ejecución de los trabajos. En el caso del reciclado de pavimentos existentes, se entenderá por tramos homogéneos aquellos que posean una estructura de materiales con similares características, que presentan una misma patología de daño y que en consecuencia requieran el mismo tratamiento.

La dosificación de la mezcla deberá realizarse con material obtenido del pavimento existente, idealmente por fresado mediante un equipo que simule la acción de la maquinaria que se utilizará en el proceso de estabilización. En su defecto el material se obtendrá mediante la excavación de al menos una calicata de 50 cm. de profundidad dentro del tramo homogéneo. La dosificación deberá incluir el valor de la tracción indirecta (ITS) en condición seca y saturada. Para un adecuado desarrollo de esta etapa del proyecto, el Contratista deberá contar con las instalaciones y equipos necesarios para realizar el control en campo de las mezclas con asfalto espumado, el cual deberá ser aprobado por el Delegado Residente.

La fórmula de trabajo indicará lo siguiente:

- La proporción e identificación (en peso seco) de cada fracción del material granular, si se requieren agregados de adición.
- La granulometría de cada fracción del material granular y la granulometría combinada, si se requieren agregados de adición.

- El porcentaje de agua para mezcla y compactación, en relación con el peso seco del componente mineral.
- El porcentaje óptimo de asfalto espumado, en relación con el peso seco del material reciclado y el componente mineral adicional sí se requiere.
- La identificación y dosificación del agente estabilizador, sí se requieren, que deben ser de la misma marca utilizada en las pruebas de laboratorio y en la fase de experimentación.
- La resistencia a la tracción indirecta.
- La densidad máxima y la humedad óptima correspondientes a la densidad de diseño.
- Los resultados de los ensayos complementarios que se indiquen en las especificaciones técnicas.

Esta información deberá presentarla el Contratista antes de iniciar los trabajos con 15 días de anticipación como mínimo, para que el Delegado Residente pueda hacer las verificaciones y rectificaciones que estime convenientes y aprobar la fórmula de trabajo.

4.4.1. Ensayo de Tracción Indirecta (ITS)

El ensayo de Tracción Indirecta (ITS) se realizará de acuerdo al siguiente procedimiento:

- Se fabricarán seis muestras de 4" de diámetro con equipo Marshall aplicando 75 golpes por cara.
- Las muestras se sacarán del molde después de 24 horas de fabricadas.
- Se colocarán las muestras sobre una bandeja plana y lisa y se curarán en un horno de aire forzado por 72 horas a 40°C.

- Las muestras serán removidas del horno después de las 72 horas y se dejarán enfriar a temperatura ambiente antes de ser ensayadas.
- A continuación se medirá la altura de cada una en cuatro puntos y se calcula su altura promedio (L) e igualmente su diámetro (D) en metros.
- Seguidamente tres de las probetas serán ensayadas a tracción indirecta (ITS) en condición seca y tres en condición saturada.
- El ensayo de ITS consiste en aplicar carga a las muestras a una velocidad de deformación de 50.8mm/min sobre su eje diametral utilizando el cabezal de ruptura Lottman, hasta provocar la ruptura de la probeta. La falla debe provocarse en el eje axial de la muestra, si se provoca otro tipo de falla, la muestra deberá ser eliminada.
- Para determinar el ITS en condición seca se debe proceder como sigue:
- Colocar la muestra en una cámara de aire a $25 \pm 1^\circ\text{C}$ al menos 1 hora, pero no más de 2 horas antes del ensayo.
- Luego de remover la muestra de la cámara de aire y colocarla en el aparato de carga axial de tal forma que el pistón de carga quede paralelo y centrado sobre el plano vertical de la muestra.
- Colocar el plato de transferencia de carga en la superficie centradamente y bajar el pistón de dispositivo de ensayo de compresión.
- Aplicar la carga a la muestra a una velocidad de 50.8 mm/min hasta conseguir la máxima carga (falla en el eje axial de la muestra). Registrar esta carga P (en kN) con una precisión de 0.1 kN.

Para determinar el ITS en condición saturada se debe proceder de la siguiente manera:

- Saturar la muestra en un baño de agua a $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ por 24 horas.
- Remover la muestra, secar la superficie de modo de llevarla a condición saturada y superficialmente seca.

- Colocar el plato de transferencia de carga en la superficie centradamente y bajar el pistón de dispositivo de ensayo de compresión.
- Aplicar la carga a la muestra a una velocidad de 50.8 mm/min hasta conseguir la máxima carga (falla en el eje axial de la muestra). Registrar esta carga P (en kN) con una precisión de 0.1 kN.

Calcular la ITS para cada probeta aproximando a 1 kPa, usando la siguiente fórmula:

$$RTI = \frac{2P}{\pi LD}$$

ecuación (19)

Siendo:

RTI = resistencia a la tensión indirecta (kPa)

P = máxima carga aplicada (kN)

L = altura de la probeta (m)

D = diámetro de la muestra (m)

El ITS seco será el promedio de los tres valores obtenidos a partir de muestras ensayadas en condición seca y el ITS saturado será el promedio de las tres muestras ensayadas en condición saturada, aproximando a 1Kpa.

4.5. Equipo

El asfalto deberá estar contenido en camión cisterna, el cual deberán estar equipado con un termómetro que indique la temperatura del asfalto, una válvula de salida con un diámetro interior mínimo de 75 mm capaz de evacuar el contenido del tanque y un dispositivo de medición del volumen del contenido del tanque y calibrado a intervalos no mayores de 26.5 galones americanos (100 lt).

Cada camión tanque deberá poseer un certificado de carga que contenga la identificación del tanque, el peso neto del producto, el nombre del proveedor, número de lote y fecha de elaboración, temperatura de carga, fecha, hora y lugar de carga.

El proceso de reciclado en frío, *in situ*, mediante la tecnología del asfalto espumado deberá ser ejecutado con una máquina fresadora-recicladora, la cual deberá de cumplir como mínimo los siguientes requisitos:

- Un sistema de control en base a un microprocesador, que regule la aplicación de dosis de agua de premezclado, dosis de agua para el proceso de espumado y dosis de asfalto en función de la velocidad, avance y la profundidad de corte.
- Un sistema apropiado para espumar asfalto en base a cámaras individuales de expansión. Este sistema deberá ser equipado con una boquilla de ensayo capaz de producir una muestra de asfalto espumado y evaluar sus propiedades.
- Un tambor pulverizador y mezclador que gire de manera ascendente en la dirección de avance y que posea herramientas de corte para la fragmentación del material que se está reciclando.
- Un sistema de calefacción eléctrica que permita licuar el asfalto contenido en el sistema de asfalto espumado, con el objeto de evitar obstrucciones durante las interrupciones de la operación.

El equipo de compactación deberá estar conformado por rodillos lisos vibratorios de uno o dos tambores (tándem) y neumáticos pesados. El rodillo liso vibratorio será de amplitud y frecuencia variables y deberá tener por lo menos un peso de 19 toneladas y el rodillo neumático tendrá un peso mínimo de 23 toneladas, todos ellos en perfectas condiciones mecánicas, en especial

en lo que se refiere a la suavidad de los arranques, paradas e inversiones de marcha. La cantidad de equipo que deberá disponer el Contratista se ajustará a los requerimientos de la obra. Eventualmente pueden requerirse rodillos “pata de cabra” para algunos suelos.

Además se requiere al menos de una motoniveladora y camiones de agua para mantener la humedad óptima de compactación del material.

Si el Contratista no dispone en todo momento del total de equipo necesario para continuar satisfactoriamente con los trabajos, el Delegado Residente ordenará la paralización de los trabajos hasta que se normalice dicha situación.

4.6. Requisitos de construcción

En cada sección homogénea del tramo deberá de realizarse una prueba de campo previo a iniciar los trabajos de reciclado, cuya longitud será aprobado por el Delegado Residente con el objetivo de comprobar el buen funcionamiento de los equipos, la secuencia de trabajo y las diferentes alternativas de compactación. Este mismo tramo servirá de prueba para obtener el material reciclado, con el cual se verificará la dosificación del laboratorio y permitirá realizar los ajustes y correcciones necesarias. El ITS seco y saturado obtenido en este tramo de prueba será el que se utilice para el control de la mezcla en campo.

4.6.1. Proceso Constructivo

Sí se requiere la aplicación de material de aporte, esta deberá ser realizada esparciendo los agregados como una capa uniforme sobre la superficie de rodadura existente antes del fresado. El espesor de dicha capa será determinado en función de la cantidad de material requerida en el tramo homogéneo. El contratista será responsable de asegurar que la calidad de todo el material de aporte, esté de acuerdo con los requerimientos de diseño de las mezclas de asfalto espumado y conforme la tabla VIII.

La aplicación del agente estabilizador se hará por medios mecánicos u otro que garantice que la cantidad a aplicar será la especificada en el diseño de la mezcla. La cantidad del agente estabilizador a emplear será expresada como porcentaje del material a reciclar y será determinada en función de los diseños de mezcla realizados en laboratorio considerando las condiciones en campo, para las condiciones prevalecientes al momento de construir. Salvo indicación en contrario en la dosificación, la cantidad de agua a adicionar al material reciclado con aporte de material, será 75% de su contenido óptimo de compactación obtenida mediante el ensayo de Proctor Modificado, descrito en la sección 306 y 306.07 de las Especificaciones Generales de Construcción para carreteras y puentes de la DGC y AASHTO T- 180. El aporte del agua será controlado en campo por un microprocesador instalado en la máquina recicladora.

El contratista deberá tomar todas las precauciones necesarias para evitar el exceso de agua en la mezcla, conforme la sección 306. Incisos 306.05 y 306.06 de otra manera, la porción de ésta que presente dicho efecto será rechazada y el contratista deberá realizar a su costo la corrección del contenido de humedad por medio del reprocesamiento y secado del material.

El cemento asfáltico deberá ser incorporado en el proceso de mezclado mediante el bombeo desde los tanques móviles ubicados de acuerdo al sentido de avance de la máquina recicladora. Los tanques deberán estar provistos de termómetros para asegurar que la temperatura del cemento asfáltico sea la especificada en el diseño de la mezcla con asfalto espumado, permitiéndose tolerancias de $\pm 5^{\circ}\text{C}$ del rango óptimo obtenido en el diseño. Sí el cemento asfáltico es sobrecalentado por sobre el rango especificado, éste no podrá ser utilizado. Al inicio del proceso de reciclado se deberá verificar las propiedades de espumación del asfalto obteniendo una muestra de espuma desde la boquilla de ensayo de la recicladora.

Durante el proceso de estabilización también se deberán verificar estas propiedades para lo cual se deberán tomar muestras durante el proceso de reciclado.

La cantidad de asfalto a utilizar será expresado como porcentaje del material en peso seco a reciclar y determinado en función de los diseños de mezclas realizados en laboratorio, con las correcciones correspondientes por las condiciones granulométricas y de humedad, prevalecientes al momento de construir.

El control de la cantidad de asfalto utilizado en el proceso de estabilización de cada tramo, será realizado midiendo el contenido de asfalto residual en el tanque al finalizar cada jornada de trabajo, y de este modo calcular el consumo real de asfalto el cual se comparará con la demanda teórica prevista. El consumo de asfalto también puede ser obtenido desde el microprocesador de la máquina recicladora. Cuando se conecte un nuevo tanque al equipo reciclador, se deberá revisar la temperatura del asfalto en el tanque, usando el termómetro

calibrado. Al descargar las últimas toneladas de asfalto desde el tanque distribuidor, deberá evitarse el bloqueo del sistema de reciclado por la presencia de pequeñas partículas de carbón en el asfalto. Este problema deberá ser resuelto observando algún incremento inusual en la presión, lo que indicará que el filtro requiere limpieza. Al finalizar cada jornada deberá limpiarse el equipo de reciclado (tuberías, filtros, etc.). El descuido en la maquinaria puede producir problemas en la calidad del material estabilizado.

4.6.2. Compactación y Terminación

Inmediatamente después de la colocación de la capa estabilizada, deberá ser compactada mediante el empleo de rodillos lisos vibratorios y neumáticos pesados.

El Delegado Residente podrá autorizar otro método de compactación que de igual forma permita la obtención de una mezcla con las características de diseño indicadas en la dosificación. La compactación inicial o primaria se realizará con rodillos vibratorios lisos de uno o dos tambores, con vibración en el modo alta amplitud - baja frecuencia. Para evitar la adherencia del material bituminoso a los rodillos estos deben estar provistos de un sistema que los mantenga mojados en toda el área de contacto, pero deben evitarse los excesos de agua. Todo el equipo de compactación debe estar en buen estado de funcionamiento, sin fugas de aceites o combustibles, causa por la que este equipo será rechazado hasta que no se corrija esta falla.

Una vez terminada la compactación inicial, la superficie se conformará con motoniveladora, ajustándose a los alineamientos y secciones típicas de pavimentación.

Luego de conformado, se procederá a la compactación secundaria, compactando la mezcla hasta que alcance una densidad mínima de 98% de la Densidad Máxima de Compactación Seca determinada por el método AASHTO T-180. Para este proceso se emplearán los rodillos vibratorios de uno o dos tambores con vibración a baja amplitud - alta frecuencia.

Finalmente, para darle terminación a la capa reciclada se deberá saturar la superficie con agua y luego compactar la superficie con rodillo neumático. Si la humedad es excesiva, la mezcla tenderá a deformarse. Por el contrario, si la humedad es escasa, no se podrá obtener la densidad deseada. Si la humedad de la mezcla es muy elevada, se debe eliminar el exceso de agua suspendiendo la compactación, aireando y recompactando posteriormente.

El material tratado con asfalto espumado puede ser recompactado sin afectar su resistencia última, manteniendo el contenido de humedad aproximadamente al mismo nivel que se usó para la compactación primaria. En esta condición el material puede ser recompactado al día siguiente y entonces terminado apropiadamente. Sin embargo, si ocurre un secado excesivo, la recompactación afectará negativamente la resistencia última del material, en este caso se deberá someter el material a un reproceso de revoltura con la adición del agua perdida, a través de la máquina fresadora.

El contratista deberá tomar todas las precauciones necesarias para que esto no suceda para lo cual deberá planificar la terminación completa del proceso de reciclado en la jornada de trabajo. El número de pasadas de cada rodillo necesarias para lograr el grado de compactación especificado se determinará a través del tramo de prueba. La superficie de la capa terminada deberá estar libre de laminaciones superficiales, corrugaciones o segregaciones o algún otro defecto que pueda afectar su comportamiento.

4.6.3. Protección y mantenimiento de la capa de material estabilizado

El contratista deberá proteger y mantener a su costo, la capa de material estabilizado hasta que la siguiente capa sea colocada. El mantenimiento debe incluir la inmediata reparación de cualquier defecto o bache que se origine en la capa.

4.6.4. Limitaciones meteorológicas

No deberá realizarse ningún trabajo de estabilización con asfalto espumado bajo la lluvia o que las condiciones de amenaza de lluvia estén presentes durante la realización de los trabajos. Así mismo, estos no podrán realizarse cuando la temperatura ambiente se encuentre por debajo de los 5°C.

4.7. Control de calidad

En cada jornada de trabajo deberá tomarse de la parte posterior de la máquina recicladora la cantidad de muestra necesaria para fabricar seis muestras, de las cuales tres serán ensayadas a tracción directa en seco y tres en condición saturada, según lo indicado anteriormente. Para verificar el espesor de la capa se obtendrá un conjunto de ocho mediciones por cada kilómetro reciclado, las cuales deberán cumplir con las siguientes tolerancias:

$$DI \geq \text{Desp} - (\text{Desp}/20)$$

Los espesores individuales deberán ser superiores o iguales al espesor especificado menos la veinteava parte de éste, y

$$D_{prom} \geq D_{esp}$$

El espesor promedio de las mediciones en un kilómetro deberá ser mayor o igual al espesor especificado.

Siendo:

DI= espesores individuales

Dprom=espesor promedio

El ancho de la capa reciclada nunca deberá ser menor al establecido en los planos del proyecto. La variación en la cota de cualquier punto de una sección transversal no puede superar los 15 mm. El control de la compactación en campo deberá ser realizado mediante el empleo de un densímetro nuclear y se exigirá una densidad mínima de 98% de la Densidad Máxima de Compactación Seca del Proctor Modificado.

4.8. Medida

La unidad de medida de la capa de material reciclado estabilizado con asfalto espumado será el metro cúbico (m³) aproximado al entero, de material colocado y compactado a satisfacción del Supervisor.

El volumen de la capa de material reciclado estabilizado con asfalto espumado se determinará multiplicando la longitud real construida, medida a lo largo del eje del proyecto, por el ancho y espesor mostrados en los planos del proyecto o ajustados a los cambios ordenados por el Delegado Residente.

4.9. Forma de pago

El pago se hará por metro cúbico de pavimento asfáltico reciclado estabilizado con asfalto espumado a los precios unitarios contractuales, por toda obra de acuerdo con estas Especificaciones y aceptada a satisfacción por el Delegado Residente.

Los precios unitarios de la capa de material reciclado estabilizado con asfalto espumado deberán incluir la compensación total por el suministro en el lugar de la obra todos los materiales requeridos para la construcción de la capa, así como herramientas, equipos y la ejecución completa de los trabajos contratados, a satisfacción plena del Delegado Residente.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis de los resultados obtenidos se muestra a continuación:

- Se mantiene la integridad estructural de las capas subyacentes de la estructura de pavimento. Únicamente se perturba hasta la profundidad de corte del reciclado.
- Las muestras de los materiales para los ensayos geotécnicos de los materiales deben de obtenerse de los diferentes tramos homogéneos identificados a lo largo del proyecto.
- La característica más importante en el proceso de espumación es la razón de expansión y la vida media del asfalto espumado, se recomienda por lo menos 15 segundos de vida media y una razón de expansión entre 8-15 veces su volumen original.
- El ensayo más importante para determinar la resistencia estructural del asfalto espumado es el de la resistencia a la tracción indirecta. Este ensayo debe de realizarse en condición seca y saturada a una tasa de deformación constante de 50.8 mm/min. sobre su eje diametral.
- Para el diseño de la estructura del pavimento:
 - Los estudios de tránsito deberán de ser confiables para determinar con bastante exactitud la cantidad de ejes equivalentes que circularán por el proyecto durante el período de diseño.

- La estabilización con asfalto espumado incrementa la capacidad del pavimento para resistir las cargas al aumentar el número estructural efectivo.
- Los valores de los módulos de resiliencia de las capas de subrasante, subbase y base pueden obtenerse a través de la correlación siguiente: $M_r = 2555 \cdot \text{CBR}^{0.64}$.
- Los coeficientes de capa para materiales estabilizados con asfalto espumado dependen de los resultados obtenidos en el ensayo de la resistencia a la tracción indirecta, como se indica en la figura 24.
- El número estructural efectivo de un pavimento con asfalto espumado está constituido por los espesores de la capa de rodadura, base estabilizada con asfalto espumado, la capa de base y la capa de la subbase. El número estructura está conformado por la siguiente fórmula: $\sum D_i \cdot a_i \cdot m_i$.
- Durante el proceso constructivo:
 - El chequeo completo de la maquinaria y equipo que se va a utilizar en la operación de reciclado.
 - Medir la temperatura del asfalto y la superficie del camino.
 - Comprobar que existe suficiente cantidad de agua, agente estabilizador y cemento asfáltico en los camiones cisterna.

- Revisar el ensamble correcto del tren de reciclado y asegurar las barras de empuje.
 - Después de colocada la capa estabilizada deberá mantenerse la humedad óptima para alcanzar la densidad máxima de compactación.

 - El cemento deberá dispersarse delante de la máquina recicladora y a lo largo del tramo a reciclar de conformidad con las cantidades requeridas.

 - El control diario de la calidad de la obra en lo referente a la obtención de muestras para ensayos de laboratorio ITS, es determinante para obtener un producto de calidad dentro de las expectativas de diseño.

 - Marcarse claramente la línea guía y la profundidad de corte. La cota inferior de corte debe ser revisada periódicamente con una varilla de control de nivel. Deberá marcarse una línea guía paralela al borde del corte que indique el traslape.
- Las especificaciones técnicas propuestas son el resultado de las experiencias de proyectos de reciclado con asfalto espumado realizados en Guatemala.

 - Estas especificaciones técnicas pretenden seguir la misma metodología de presentación que contienen las Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos, para facilitar su inserción dentro de las mismas sí fuesen tomadas en cuenta.

CONCLUSIONES

1. El diagnóstico y evaluación de la estructura del pavimento permite determinar las condiciones del pavimento existente (topografía, tipos de fallas, condiciones de drenaje, tipo de tránsito, condiciones climáticas, etc.).
2. Las características físicas y mecánicas de los materiales de aporte del pavimento existente, se identifican a través de la toma de testigos y muestras a partir de las calicatas, para obtener el espesor de la capa asfáltica y las capas subyacentes. De estos ensayos se obtiene la información que nos permita identificar las características siguientes:
 - Granulometría
 - Índice de plasticidad
 - CBR
 - Ensayo proctor modificado (Curva densidad-humedad).
3. Los equipos de laboratorio de simulación son una herramienta valiosa porque nos permiten determinar la dosificación exacta de la mezcla reciclada que proporciona cada una de las cantidades de los agregados, asfalto, agua, agente estabilizador.
4. El diseño de la mezcla de los agregados de aporte del pavimento existente, tiene como principal finalidad lograr la optimización de cada uno de ellos y obtener sus máximas resistencias, obteniendo de esta manera una obra de calidad y durabilidad conforme las expectativas de diseño.

5. Al aplicar la fórmula de diseño de las estructuras de pavimentos AASHTO del año 1993 se puede determinar con exactitud el número estructural para obtener los espesores que conforman el paquete estructural del proyecto.
6. El modelo de especificaciones técnicas tiene la misma estructura metodológica que el de las Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos. Se define y describe el proceso del reciclado en frío, los requisitos de los materiales a utilizarse, la composición de la mezcla o fórmula de trabajo, el procedimiento para realizar el Ensayo de ITS, la descripción del tren de reciclado y el proceso constructivo, control de calidad, unidad de medida y forma de pago del reciclado.
7. La utilización de esta tecnología es de beneficio para Guatemala por el reaprovechamiento de los materiales de las carreteras y coadyuva a evitar la explotación de nuevos bancos de materiales y de esta manera reducir el impacto ambiental.
8. El reciclaje con asfalto espumado ha demostrado diversas ventajas sobre otros procesos constructivos:
 - 8.1. Mejora la tasa de producción diaria, con lo cual se logra un alto rendimiento
 - 8.2. Permite el flujo vehicular de circulación durante el proceso constructivo
 - 8.3. Al reutilizar los materiales colocados en la carpeta de asfalto, reduce los costos de obtención de productos vírgenes
 - 8.4. Alta capacidad soporte de la nueva estructura de pavimento

RECOMENDACIONES

1. La evaluación y diagnóstico técnico del pavimento debe ser realizado por profesionales maestros en ciencias de la ingeniería vial, para determinar las causas que han provocado la falla estructural del pavimento.
2. Las muestras de los materiales que conforman la mezcla: RAP + Base Granular obtenidas de las calicatas o idealmente del material pulverizado obtenido por la máquina recicladora y provenientes de los tramos homogéneos, (sin la incorporación de asfalto espumado), deben someterse a ensayos geotécnicos para determinar su granulometría e índice de plasticidad. Sí el IP es <10 deberá utilizarse cemento Portland.
3. Se analizan distintos porcentajes de asfalto a distintas temperaturas (160, 170, 180 °C) con la finalidad de definir la combinación que maximiza los parámetros de la espuma. Los equipos simuladores de laboratorio deben de estar en perfectas condiciones de funcionamiento que permitan obtener dosificaciones exactas para la optimización de la razón de expansión y la vida media del asfalto espumado. La razón de expansión mínima > 8 y vida media > 6 segundos.
4. Realizar un programa de optimización preparando varias porciones idénticas de muestras, mezclándolas con diferentes cantidades de agente estabilizador. Se le adiciona suficiente agua para lograr el contenido óptimo de humedad.

- 4.1. Se preparan varias muestras de mezclas con diferentes proporciones de agente estabilizador.
 - 4.2. Las muestras son fabricadas usando un esfuerzo de compactación estándar.
 - 4.3. Son curadas para simular las condiciones naturales del terreno.
 - 4.4. Después del curado son ensayadas a la resistencia a la tracción indirecta por hendimiento, a probetas curadas por 72 horas. Se deberá maximizar el ITS saturado. ITS seco mínimo = 200 Kpa. ITS saturado mínimo = 100 Kpa.
5. Los datos de los estudios de tránsito son el parámetro de diseño de pavimentos más importante en el Método de la AASHTO'93, por lo que deben ser confiables, ya que de las proyecciones del tránsito futuro se obtienen la cantidad de ejes equivalentes que circularán por el proyecto, durante el período de diseño.
 6. Es necesaria la implementación e inclusión dentro de la normativa guatemalteca vial de las especificaciones técnicas aquí formuladas para los trabajos de rehabilitación con asfalto espumado, porque actualmente para la realización de los mismos, se utilizan manuales elaborados y tomando como base la experiencia de otros países.

BIBLIOGRAFÍA

1. Akeroy, FM; Hicks, BJ. 1988. Foamed bitumen road recycling: highways. no. 56:42-43.
2. Cardona, V; Camilo, A. 2007. Predicción del índice de rugosidad internacional en pavimentos flexibles usando redes neuronales artificiales. Medellín, Colombia, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Escuela de Ingeniería Civil.
3. Coronado, B; Jorge, M. 2009. La Infraestructura Vial y el Transporte, Caso Ruta del Atlántico. Tesis de Graduación. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Escuela de Postgrado.
4. Coronado, I; Jorge. 2002. Manual Centroamericano para Diseño de pavimentos. Guatemala, Secretaría de Integración Económica Centroamericana (SIECA); Agencia Internacional para el Desarrollo de los Estados Unidos, USAID.
5. Corredor M.; Gustavo (s.f.). Diseño de Pavimentos 1. Maestría en Vías Terrestres, Módulo III ,Caracas, Venezuela, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Tecnología de la Construcción, Programa de Capacitación Académica.

6. _____. (s.f.). Obtención y Manejo de la Información de tránsito para el Diseño de Pavimentos Flexibles. Maestría en vías terrestres, Módulo II. Caracas, Venezuela. Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Tecnología de la Construcción, Programa de Capacitación Académica.
7. Faúndez C, RA. 2012. Estimación del coeficiente estructural del asfalto espumado mediante análisis de deflectometría FWD. Santiago de Chile, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil.
8. Fernández M, JM. J. 2010. Estudio definitivo y ejecución del proyecto Conococha-Yanacancha, reciclado con asfalto espumado. Lima, Perú, Universidad Ricardo Palma, Facultad de Ingeniería.
9. González M. 2010. Caminos básicos y reciclado de pavimentos con la Tecnología del Asfalto Espumado. Chile. Centro de Ingeniería e Investigación Vial (CIIV) DICTUC S.A; Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería, Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción.
10. Ingenieros Consultores de Centroamérica, S.A. 2002. Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes de la Dirección General de Caminos. Guatemala, DGC.
11. Instituto de Desarrollo Urbano. 2005. Especificaciones técnicas generales de materiales y procesos constructivos para proyectos en infraestructura vial y de espacio público en Bogotá D.C. Colombia. IDU.

12. Laboratorio Nacional de Materiales y de Modelos Estructurales (LANAMME) Consultora. 2001. Manual Centroamericano de Especificaciones para la construcción de carreteras y puentes regionales. Secretaría de Integración Económica Centroamericana (SIECA). Costa Rica. Universidad de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Civil.
13. Loizos, A; Collings, D; Jenkins, K. 2005. Rehabilitation of a major Greek highway by recycling: Stabilising with foamed bitumen. Greece. National Technical University of Athens.
14. Montejo, FA. 2008. Ingeniería de pavimentos: el asfalto espumado. Colombia. Panamericana Formas e Impresos.
15. Robles D, RA. 2009. Guía para diseñar la rehabilitación de una ruta mediante el uso de asfalto espumado reciclando el pavimento asfáltico existente. Tesis de Graduación. Chile. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Escuela de Construcción Civil.
16. Rodríguez M, JA; Rodríguez M, CE. 2004. Evaluación y rehabilitación de pavimentos flexibles por el Método del Reciclaje. Tesis de Graduación. El Salvador. Universidad de El Salvador, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela de Ingeniería Civil.
17. Rosales C, VA. 2011. Rehabilitación de carreteras utilizando asfalto espumado reciclando el pavimento asfáltico existente. Tesis de Graduación. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil.

18. Thenoux, G; Jamet, A. 2002. Tecnología del asfalto espumado y diseño de mezcla. Revista Ingeniería de Construcción Pontificia Universidad Católica de Chile, no. 25:20-36.
19. Wirtgen, GmbH, 2004. Manual de reciclado en frío. Alemania, Windhagen.
20. Cotacallapa Cáceres, Y. 2011. Reciclado en frío de pavimentos flexibles con asfalto espumado. Informe Técnico Profesional. Moquegua, Perú. Universidad Alas Peruanas, Facultad de Ingenierías y Arquitecturas, Escuela Académico Profesional de Ingeniería Civil.
21. Ministerio de Obras Públicas. Dirección de Vialidad. 2003. Manual de carreteras: Especificaciones Técnicas Generales de Construcción. Chile. Vol. 5.