



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Civil

**REHABILITACIÓN DE CARRETERAS UTILIZANDO ASFALTO ESPUMADO,  
RECICLANDO EL PAVIMENTO ASFÁLTICO EXISTENTE**

**Víctor Alejandro Rosales Castañeda**  
Asesorado por el Ing. Tonio Michele Bonatto Mérida

Guatemala, septiembre de 2011

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**REHABILITACIÓN DE CARRETERAS UTILIZANDO ASFALTO ESPUMADO,  
RECICLANDO EL PAVIMENTO ASFÁLTICO EXISTENTE**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**VÍCTOR ALEJANDRO ROSALES CASTAÑEDA**  
ASESORADO POR EL ING. TONIO MICHELE BONATTO MÉRIDA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO CIVIL**

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2011

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

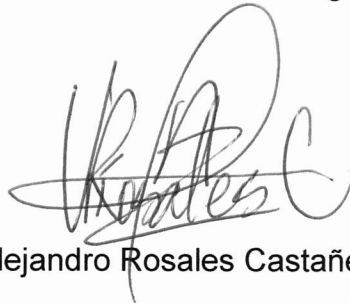
DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADORA	Inga. María del Mar Girón Cordón
EXAMINADOR	Ing. Juan Carlos Linares Cruz
EXAMINADOR	Ing. Jorge Alejandro Arévalo Valdez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## 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:

### **REHABILITACIÓN DE CARRETERAS UTILIZANDO ASFALTO ESPUMADO, RECICLANDO EL PAVIMENTO ASFÁLTICO EXISTENTE**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 25 de noviembre de 2010.



Víctor Alejandro Rosales Castañeda

Guatemala, 04 de julio de 2011

Ingeniero

Mario Estuardo Arriola Ávila

Coordinador del Área de Topografía y Transportes

Facultad de Ingeniería

Universidad de San Carlos de Guatemala

Guatemala

Estimado Ingeniero:

Por este medio me permito presentar ante usted, el trabajo de graduación titulado **REHABILITACIÓN DE CARRETERAS UTILIZANDO ASFALTO ESPUMADO, RECICLANDO EL PAVIMENTO ASFÁLTICO EXISTENTE**, del estudiante universitario Víctor Alejandro Rosales Castañeda, manifestándole al mismo tiempo que el presente trabajo cumple satisfactoriamente con los requisitos necesarios para mi aprobación.

Sin otro particular y agradeciendo su atención, me suscribo.

Atentamente,

A large, stylized handwritten signature in black ink, consisting of several overlapping loops and lines. The signature is written over the printed name and title of the signatory.

Ing. Tonio Michele Bonatto Mérida

Asesor



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
www.ingenieria-usac.edu.gt



Guatemala,  
5 de agosto de 2011

Ingeniero  
Hugo Leonel Montenegro Franco  
Director Escuela Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos

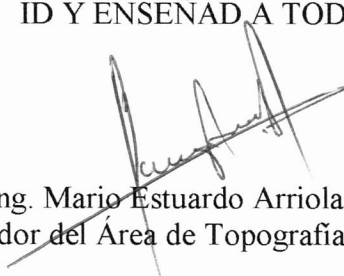
Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **REHABILITACIÓN DE CARRETERAS UTILIZANDO ASFALTO ESPUMADO, RECICLANDO EL PAVIMENTO ASFÁLTICO EXISTENTE**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Víctor Alejandro Rosales Castañeda, quien contó con la asesoría del Ing. Tonio Michele Bonatto Mérida.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la comunidad del área y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑADA TODOS

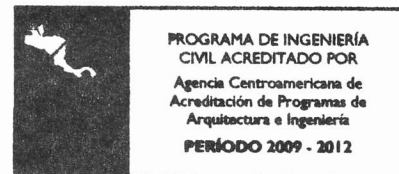
  
Ing. Mario Estuardo Arriola Ávila  
Coordinador del Área de Topografía y Transportes



FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO  
DE  
TRANSPORTES  
USAC

/bbdeb.

Más de 130 Años de Trabajo Académico y Mejora Continua





UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
www.ingenieria-usac.edu.gt



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Ing. Tonio Michele Bonatto Mérida y del Coordinador del Área de Topografía y Transportes, Ing. Mario Estuardo Arriola Ávila al trabajo de graduación del estudiante Víctor Alejandro Rosales Castañeda, titulado, REHABILITACIÓN DE CARRETERAS UTILIZANDO ASFALTO ESPUMADO, RECICLANDO EL PAVIMENTO ASFÁLTICO EXISTENTE, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

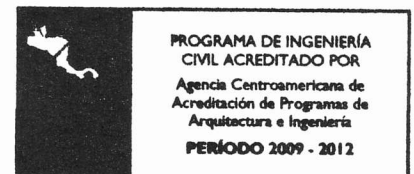
  
Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, septiembre de 2011.

/bbdeb.

Más de 130 <sup>Años</sup> de Trabajo Académico y Mejora Continua





DTG. 359.2011.

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 Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **REHABILITACIÓN DE CARRETERAS UTILIZANDO ASFALTO ESPUMADO, RECICLANDO EL PAVIMENTO ASFÁLTICO EXISTENTE**, presentado por el estudiante universitario **Víctor Alejandro Rosales Castañeda**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
Decano

Guatemala, 26 de septiembre de 2011.



/gdech



## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por darme la vida, fuerza e inteligencia para alcanzar esta meta. Por la familia que tengo.
- Mis padres** Rosa María Castañeda y Víctor Rosales Gómez. Especialmente a mi madre, con mucho amor, por su apoyo incondicional.
- Mis hermanos** María Carolina, Rosamaría, Santiago, Marco Vinicio y Diego Alejandro, por su cariño y ser fuente de mi inspiración.
- Mis sobrinos** Daniel André y Natalia Camila, poseen un lugar especial en mi corazón.
- Mis abuelos** María Cristina Gómez, Olga Acevedo, Adalberto Castañeda y Víctor Rosales.
- Mi novia** Licenciada Tania Victoria Chaluleu, por su cariño y apoyo en el logro de este sueño.
- Mis familiares** Por el apoyo que me han brindado, especialmente Karina, Bettzy, Lesbia y Jorge (q.e.p.d.). Familia Chaluleu Zúñiga.

**Mis amigos**

De vida, compañeros de trabajo y todas las personas que de alguna manera me apoyaron en la consecución de este logro. Gracias.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

**La Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala** Por haberme dado la oportunidad de superarme.

**Ingeniero Tonio Michele Bonatto Mérida** Por transmitirme sus valiosos conocimientos y experiencia en la elaboración del presente trabajo.

**Ingenieros** Irvin Martínez, Víctor Rosales Gómez, Carlos Morales y Rolando Chaluleu, por su invaluable aporte de conocimientos profesionales.

**Los profesionales** Arquitecto Giovanni Bonatto, Ingenieros Alessandro Bonatto y Rodrigo Rubio. Licenciado Otto Sierra P., por su apoyo moral y valiosa colaboración en mi formación profesional.

**La empresa Concal** Por darme la oportunidad de ampliar mis conocimientos y de formarme profesionalmente.

**Laboratorio de suelos de  
Concal**

Otto Reynoso, Luis Hernández, Yerald  
Márquez, Fermín Ramírez y Walter Alemán,  
por transmitirme sus conocimientos en  
cuanto a la mecánica de suelos.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
GLOSARIO .....	XI
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN .....	XVII
1. PAVIMENTOS DE CARRETERAS .....	1
1.1. Pavimentos asfálticos .....	1
1.1.1. Componentes de la estructura de pavimento .....	2
1.1.2. Factores que inciden en el deterioro del pavimento .....	4
1.1.3. Consecuencias del agrietamiento.....	5
1.1.4. Mantenimiento y rehabilitación de pavimentos .....	6
1.1.5. Opciones de rehabilitación.....	7
1.2. Criterios y procedimiento de diseño para pavimentos asfálticos (guía <i>AASHTO 1993</i> ).....	10
1.2.1. Tránsito y carga por eje .....	10
1.2.2. Tasa de crecimiento.....	12
1.2.3. Número de carriles.....	12
1.2.4. Ejes equivalentes “ESAL” ( <i>Equivalent Single                 Axle Load</i> ).....	13
1.2.5. Características de la sub-rasante (Módulo de Resistencia) .....	14
1.2.6. Clima y drenaje .....	15
1.2.7. Coeficientes estructurales.....	16

1.2.8.	Determinación de los coeficientes de capa .....	16
1.2.9.	Período de diseño .....	20
1.2.10.	Nivel de servicio .....	20
1.2.11.	Confiabilidad.....	20
1.2.12.	Desviación estándar .....	21
1.2.13.	Determinación del número estructural.....	21
2.	PROCEDIMIENTO A SEGUIR EN LA EVALUACIÓN DE UN PAVIMENTO ASFÁLTICO .....	25
2.1.	Inspección visual.....	26
2.2.	Pozos a cielo abierto .....	26
2.3.	Muestreo de las distintas capas .....	27
2.4.	Ensayos de laboratorio utilizados en el control de calidad .....	28
2.5.	Interpretación de los resultados de laboratorio obtenidos .....	33
2.6.	Especificaciones más usadas de los materiales que conforman la estructura del pavimento asfáltico .....	36
3.	FALLAS EN LOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.....	39
3.1.	Tipos de fallas .....	40
3.2.	Posibles causas .....	44
3.3.	Recomendación de soluciones.....	45
4.	OPCIONES PRELIMINARES DE DISEÑO EN LA REHABILITACIÓN DE PAVIMENTOS.....	47
4.1.	Método de guías de diseño .....	49
4.2.	Método del número estructural.....	50
4.3.	Método basado en las deflexiones .....	51

5.	RECICLADO EN FRÍO .....	53
5.1.	Generalidades .....	53
5.2.	El proceso de reciclado en frío .....	53
5.2.1.	Reciclado en planta .....	54
5.2.2.	Reciclado “ <i>in situ</i> ” .....	55
5.3.	Aplicaciones de reciclado en frío .....	58
5.3.1.	Reciclado del 100% de RAP ( <i>Recycled Asphalt Pavement</i> ).....	58
5.3.2.	Estabilización con RAP/Base granular.....	59
5.3.3.	Pulverización .....	59
5.3.4.	Reprocesamiento.....	60
5.3.5.	Modificación de propiedades mecánicas .....	60
5.4.	Tipos de máquinas recicladoras .....	61
5.5.	Beneficios del reciclado en frío .....	64
6.	AGENTES ESTABILIZADORES .....	65
6.1.	Tipos de agentes estabilizadores .....	65
6.2.	Estabilización con asfalto .....	66
6.3.	Estabilización con emulsión asfáltica.....	66
6.4.	Estabilización con asfalto espumado.....	67
7.	ASFALTO ESPUMADO.....	69
7.1.	Propiedades del asfalto espumado.....	69
7.2.	Calidad del asfalto espumado .....	71
7.2.1.	Factores que influyen en la propiedad de la espuma .....	73
7.2.2.	Características aceptables del asfalto espumado .....	74

7.3.	Empleo del asfalto espumado como ligante para la mezcla en frío .....	77
7.3.1.	Campos de aplicación .....	77
7.3.2.	Idoneidad de la mezcla de agregados empleada.....	79
7.3.3.	Propiedades de la mezcla en frío .....	80
8.	DISEÑO DE MEZCLAS DE AGREGADOS CON ASFALTO ESPUMADO .....	81
8.1.	Características .....	81
8.2.	Equipo de laboratorio .....	82
8.3.	Optimización de las propiedades .....	83
8.4.	Preparación de agregados pétreos .....	83
8.5.	Tratamiento de agregados con asfalto espumado .....	84
8.6.	Contenido de humedad y asfalto.....	85
8.7.	Compactación de las muestras .....	86
8.8.	Curado.....	86
8.9.	Determinación del peso específico aparente.....	87
8.10.	Determinación de la Resistencia a la Tracción Indirecta ( <i>ITS</i> ) ....	87
8.11.	Determinación del contenido de asfalto de diseño .....	88
9.	PROCEDIMIENTO DE CONSTRUCCIÓN CON ASFALTO ESPUMADO .....	89
9.1.	Equipo .....	89
9.2.	Proceso constructivo .....	89
9.2.1.	Estabilización.....	89
9.2.2.	Compactación y terminación .....	90
9.2.3.	Limitaciones meteorológicas .....	91
9.2.4.	Control de la obra .....	92



9.2.5.	Condiciones de seguridad .....	92
10.	EJEMPLO DE PROYECTO DE RECICLADO DE PAVIMENTOS USANDO ASFALTO ESPUMADO .....	93
	CONCLUSIONES .....	107
	RECOMENDACIONES .....	109
	BIBLIOGRAFÍA.....	111



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Transferencia de carga a través de la estructura del pavimento.....	1
2.	Estructuración típica de pavimentos flexibles.....	2
3.	Indicadores de deterioro de pavimentos .....	4
4.	Típico deterioro de pavimento por fatiga y con bombeo de finos .....	6
5.	Gráfica de monitoreo de calidad de la carpeta de rodadura.....	7
6.	Determinación de coeficiente estructural de sub-base.....	17
7.	Determinación de coeficiente estructural de base.....	18
8.	Determinación de coeficiente estructural de capa de rodadura asfáltica. ....	19
9.	Pozo a cielo abierto.....	28
10.	Fisuras piel de cocodrilo.....	43
11.	Fallas de ahuellamiento y corrimiento.....	44
12.	Alternativas de conservación para falla superficial.....	47
13.	Alternativas de conservación para falla estructural en capas superiores. ....	48
14.	Alternativas de conservación para falla por asentamiento de la estructura.....	48
15.	Proceso de reciclado.....	55
16.	Típico tren reciclador con mezclador de lechada. ....	57
17.	Típico tren reciclador con mezclador de lechada. ....	57
18.	Recicladora Wirtgen WR2000, montada sobre neumáticos. ....	62
19.	Recicladora Wirtgen WR2500 S, montada sobre neumáticos.....	62
20.	Recicladora Wirtgen WR 4200. ....	63

21.	Configuración del reciclador WR 4200.....	64
22.	Producción de asfalto espumado.....	68
23.	Relación entre factor de expansión y vida media.....	71
24.	Características del asfalto espumado. ....	72
25.	Características de granulometría para tratamiento con asfalto espumado.....	76
26.	Materiales para la producción de capa de rodadura y de base ligadas de forma bituminosa.....	78
27.	Materiales utilizados en el reciclaje de materiales existentes .....	79
28.	Materiales utilizados en el reciclaje de materiales existentes, empleando asfalto espumado y cemento.....	79
29.	Baches con exposición de capa de base.....	94
30.	Bacheos realizados en la ruta.....	94
31.	Coeficientes estructurales sugeridos para materiales estabilizados con asfalto espumado.....	101
32.	Preparación de la pista para iniciar el reciclado.....	104
33.	Configuración del tren de reciclado.....	104
34.	Proceso de reciclado y producción de asfalto espumado. ....	105
35.	Compactación del material reciclado y estabilizado.....	105
36.	Humectación de la pista estabilizada con asfalto .....	106
37.	Colocación de la carpeta de rodadura asfáltica. ....	106

## TABLAS

I.	Clasificación de vehículos según su peso y número de ejes .....	11
II.	Tabla de factores por carriles en cada sentido .....	13
III.	Tiempos y coeficientes de drenaje recomendados por AASHTO. ....	16
IV.	Modos y tipos de deterioro del pavimento .....	43
V.	Tabla resumen de sub rasante .....	95

VI.	Tabla resumen de capa de sub base .....	95
VII.	Tabla resumen de capa de base .....	95
VIII.	Espesores de capas existentes.....	96
IX.	Conteos vehiculares del proyecto .....	97
X.	Parámetros de Evaluación del pavimento .....	99
XI.	Compación entre número estructura requerido y aportado .....	103



## GLOSARIO

<b>Asfalto</b>	Es una mezcla de líquidos orgánicos altamente viscosa, negra y pegajosa, derivada del petróleo, completamente soluble en disulfuro de carbono y compuesta principalmente por hidrocarburos aromáticos policíclicos. Se utiliza frecuentemente en el rubro de la pavimentación de calles y carreteras.
<b>Asfalto espumado</b>	Se forma cuando el asfalto caliente, añadiendo una pequeña cantidad de agua, se evapora y produce una expansión explosiva del asfalto en el vapor de agua saturado.
<b>AASHTO</b>	Siglas de “ <i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i> ”.
<b>Espuma</b>	Conjunto de burbujas que se forman en la superficie de los líquidos, y se adhieren entre sí con más o menos consistencia.
<b>Sub-base y base granular</b>	Es la capa formada por la combinación de piedra o grava, con arena y suelo, en su estado natural, clasificados o con trituración parcial para construir una base integrante de pavimento.

**Sub-base y base  
triturada**

Es la capa formada por la combinación de piedra o grava trituradas, combinadas con el material de relleno, para constituir una base integrante de un pavimento destinada fundamentalmente a distribuir y transmitir las cargas originadas por el tránsito, a las capas subyacentes.

**ESAL**

*Equivalent Single Axle Load* (Carga de eje equivalente simple).

**CBR**

*California Bearing Ratio* (Ensayo de Relación de Soporte de California).



## **RESUMEN**

De acuerdo a los mapas de mantenimiento de la red vial de la Dirección General de Caminos y la Unidad de Conservación Vial del Ministerio de Comunicaciones, en Guatemala la rehabilitación de pavimentos asfálticos acaparan la mayor parte de los proyectos de construcción vial. Esto debido a que su uso facilita la circulación de la población, ya que se realiza en un tiempo relativamente corto y no es necesario interrumpir el tránsito por un tiempo prolongado después de su aplicación.

Basado en la experiencia, la rehabilitación de un pavimento asfáltico normalmente es requerida cuando el estado de la carretera se aproxima a su serviciabilidad final, combinado con el deterioro de la estructura de pavimento o cuando la estructura de pavimento necesita ser reforzada debido al aumento considerable del volumen de tránsito. Cuando un pavimento está diseñado apropiadamente y es constantemente protegido mediante mantenimientos de rutina y recapeo, el requerimiento estructural por deterioro en la rehabilitación del pavimento puede ser considerablemente minimizado; ahora bien, en el caso de un incremento sustancial del tránsito, la rehabilitación se hará con fines estructurales.

En el presente trabajo de graduación, se pretende dar los lineamientos necesarios para definir la forma de producción y utilización del asfalto espumado en la rehabilitación de carreteras; así mismo comprender el funcionamiento y comportamiento de un pavimento flexible y las diferentes capas de materiales que lo conforman.

La actividad inicial es determinar el tipo de trabajos a realizar en la carretera, ya sea rehabilitación o mantenimiento rutinario. Es necesario conocer los conceptos básicos relacionados al tema, las capas que forman una estructura de pavimento flexible, la función de la misma y los materiales idóneos a utilizar en las capas inferiores a la carpeta de rodadura en un pavimento asfáltico.

## OBJETIVOS

### General

Proporcionar una guía para la rehabilitación de pavimentos utilizando las técnicas de reciclado en frío *in-situ* y la tecnología de asfalto espumado, mostrando los procesos constructivos, herramientas de laboratorio y maquinaria requerida para el reciclado del pavimento asfáltico.

### Específicos

1. Proporcionar un documento que recopile la diversidad de parámetros que se deben tomar en cuenta al momento de comenzar el análisis de un tramo vial para el diseño y ejecución de la rehabilitación de pavimento, tales como las características de la ruta, demografía, nivel de circulación de tránsito.
2. Conocer el funcionamiento del reciclado en frío *in-situ*, así como sus propiedades, equipos utilizados y ventajas del sistema.
3. Instruirse de la tecnología del Asfalto Espumado, sus características, usos, aplicaciones, procedimiento de trabajo y ventajas.
4. Conocer la variedad de fallas que pueden aparecer en los pavimentos flexibles, así como las posibles causas que las originaron.



## INTRODUCCIÓN

La utilización de mezclas con asfalto espumado es una técnica que presenta variedad de ventajas desde el punto de vista ambiental y económico. En lo que se refiere a la producción del asfalto espumado, éste se realiza mediante un proceso en el cual se le inyecta una pequeña porción de agua al asfalto caliente dentro de una cámara de expansión, logrando la espuma que se mantiene por un período de 10 a 30 segundos, para luego volver a su volumen original, durante este período se debe mezclar la espuma con el agregado para que las gotas de asfalto aglutinen las partículas más finas y así generar una pasta que sirve de mortero entre las partículas gruesas.

Con el presente trabajo de graduación se pretende dar los lineamientos necesarios para comprender el funcionamiento y comportamiento de un pavimento flexible, así como detallar las distintas capas de materiales que conforman la estructura del pavimento. Así mismo, se mostrará la forma de producción y utilización del asfalto espumado.

La actividad inicial es determinar el tipo de trabajos a realizar en la carretera, ya sea construcción o rehabilitación. Es necesario conocer los conceptos básicos relacionados al tema, siendo estos los tipos de asfaltos que se utilizan para la fabricación de carpetas de rodadura, las capas que forman una estructura de pavimento flexible, la función de la misma y los materiales idóneos a utilizar en las capas inferiores a la carpeta de rodadura en un pavimento asfáltico.

El criterio de diseño a utilizar es el propuesto por AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*, ed. 1993), para lo cual se necesita conocer las propiedades físico-mecánicas de los suelos que conforman la estructura de pavimento. Para ello se debe contar con un laboratorio de suelos y mezclas asfálticas confiables para tener certeza en los resultados de los mismos. Dichos laboratorios de suelos deben utilizar las normas y especificaciones vigentes en el país.

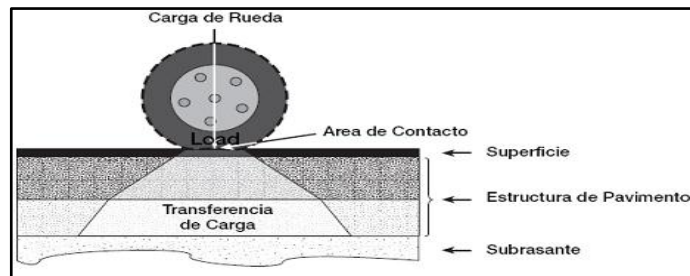
# 1. PAVIMENTOS DE CARRETERAS

## 1.1. Pavimentos asfálticos

Los pavimentos asfálticos, comúnmente llamados pavimentos flexibles, se pueden definir como la capa o conjunto de capas de materiales apropiados comprendidas entre el nivel superior de las terracerías (calles de tierra) y la superficie de rodamiento, cuya función es proporcionar una superficie uniforme, de color y textura apropiados, resistente a la acción del tránsito y destinada a transmitir a la terracería los esfuerzos producidos por cargas impuestas. Su objetivo principal es que las cargas que se transmitan hacia la sub-rasante no le provoquen deformaciones que lleguen a afectar las capas superiores.

Las fuertes cargas de tránsito aplicadas en la superficie del pavimento se van distribuyendo sobre un área más grande en las capas inferiores hasta llegar a la sub-rasante, como se ilustra a continuación.

Figura 1. **Transferencia de carga a través de la estructura del pavimento**

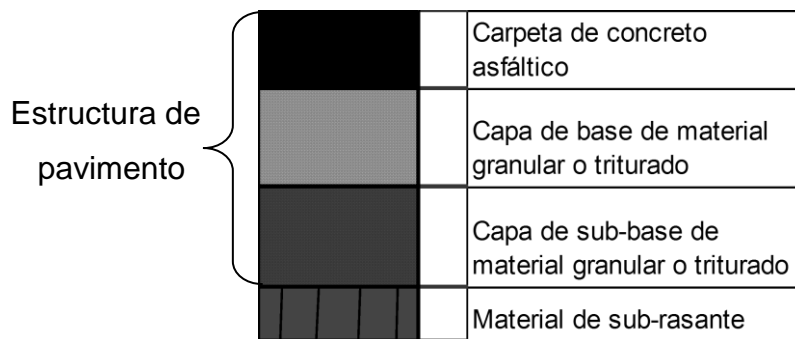


Fuente: Cold Recycling Manual, Wirtgen, Alemania 2004. p.16.

### 1.1.1. Componentes de la estructura de pavimento

Las capas que conforman un pavimento asfáltico son en el orden de arriba hacia abajo, la carpeta de rodadura de concreto asfáltico, una capa de base y posteriormente una capa de sub-base, todas las anteriores descansan sobre la sub-rasante. Debido a que los esfuerzos en un pavimento decrecen con la profundidad, se deberán colocar los materiales de mayor capacidad de carga en las capas superiores hasta llegar al suelo natural o sub-rasante.

Figura 2. Estructuración típica de pavimentos flexibles



Fuente: elaboración propia.

La carpeta de rodadura, corresponde a la capa superior de la estructura de un pavimento asfáltico, la cual está formada por una mezcla homogénea de materiales pétreos, polvo mineral, cemento asfáltico puro o rebajado y en ocasiones aditivos. Proteger de la intemperie, lluvia, erosión, fricción de las llantas, proporcionar una rodadura que suministre confort, comodidad, textura, color, desplazamiento y sobre todo proveer seguridad a todos los usuarios de la misma mediante una superficie homogénea tanto en sentido transversal como longitudinal, son algunas de las funciones de la carpeta de rodadura.



La capa de base se encuentra ubicada en la parte inferior de la carpeta de rodadura, ésta recibe la mayor parte de los esfuerzos producidos por los vehículos, está conformada por la mezcla de piedra o grava combinada con material de relleno, en algunos casos con asfalto espumado o sólo asfalto, cemento o aglomerantes y a éstas últimas se les conoce como base estabilizada o base negra.

La capa de sub-base está formada por la mezcla de piedra o grava, combinadas con material de relleno, para constituir una sub-base integrante de un pavimento. Algunas de las funciones de la capa de sub-base dentro de una estructura de pavimento asfáltico son el de drenar el agua, absorber cargas provenientes de la superficie, reducir el costo del pavimento disminuyendo el espesor de la capa de base, proteger la capa de base aislándola de la sub-rasante evitando la contaminación por finos, absorber los cambios volumétricos de la sub-rasante, etc.

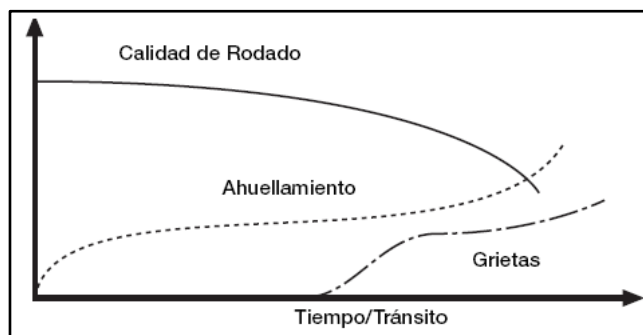
### Sub-rasante

Es el terreno natural en una carretera, que debe ser preparado y compactado para colocar sobre él una estructura de pavimento. Los suelos de sub-rasante, regularmente son suelos heterogéneos, motivo por el cual al momento de diseñar una estructura de pavimento, es necesario realizar una evaluación exhaustiva de la calidad de los mismos. La calidad de la sub-rasante es uno de los factores más importantes que definen los espesores de las capas de la estructura de pavimento.

### 1.1.2. Factores que inciden en el deterioro del pavimento

En el deterioro del pavimento inciden numerosos factores, los más comunes y de mayor importancia son los efectos ambientales y las cargas de tránsito. Este deterioro es evaluado normalmente por el aspecto de la rodadura cuando presenta fallas visibles como el ahuellamiento y agrietamiento superficial. La figura 3 muestra cómo estas características relacionan el paso del tiempo y el efecto acumulativo de las cargas de tránsito.<sup>1</sup>

Figura 3. Indicadores de deterioro de pavimentos



Fuente: Cold Recycling Manual, Wirtgen. p.20.

#### a) Factores ambientales

Los factores ambientales son los principales responsables del inicio de la mayor parte de las fallas estructurales presentes en un pavimento. La radiación ultravioleta solar, representa una de las causas más comunes que produce un endurecimiento continuo del asfalto. Con los cambios de clima producidos entre el día y la noche, producen que el endurecimiento y la dilatación posterior de la

---

<sup>1</sup> Cold Recycling Manual, Wirtgen, Alemania. Noviembre 2004.

capa asfáltica reduzca considerablemente sus propiedades elásticas y se produzcan agrietamientos en la superficie. Al existir agrietamiento en la superficie, la filtración de agua se da frecuentemente, situación que provoca un deterioro acelerado de la carpeta de rodadura y de la estructura de pavimento.

b) Efectos del tránsito

Las cargas generadas por el tránsito, regularmente son las responsables de la aparición de fallas en la superficie del pavimento, esto ocurre regularmente cuando la estructura de pavimento es débil, ha cumplido con su tiempo de vida o la carpeta de rodadura posee características inadecuadas para la misma. Todos los vehículos producen leves deformaciones en la estructura de pavimento durante un breve lapso de tiempo. Esto resulta casi insignificante cuando se trata de un vehículo liviano, lo contrario ocurre cuando las cargas son producidas por vehículos pesados, ya que las deformaciones alcanzan niveles altos ocasionando que lleguen a ser permanentes, traduciéndose en ahuellamientos.

**1.1.3. Consecuencias del agrietamiento**

Cuando existe agrietamiento en la superficie de la estructura del pavimento, el ingreso del agua no se puede controlar, situación que incide en la pérdida de capacidad soporte de los materiales subyacentes debido a la migración de finos, originando conjuntamente con el agrietamiento, baches y hundimientos. Cuando las cargas de tránsito son constantes y de consideración, las fallas en el pavimento pueden verse agravadas.

Figura 4. **Típico deterioro de pavimento por fatiga y con bombeo de finos**



Fuente: fotografía proporcionada por la empresa CONCAL.

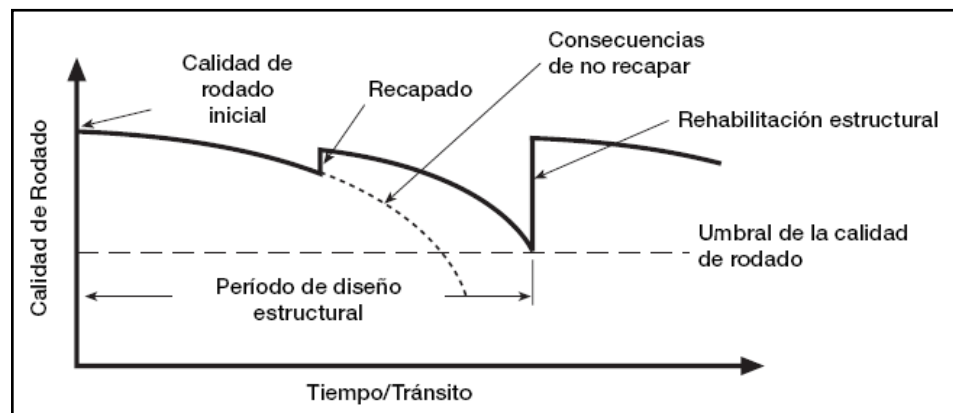
Así mismo, el agrietamiento de la superficie también se puede producir en pavimentos en donde no existe mayor tránsito vehicular. Esto ocurre regularmente en superficies asfálticas de poco espesor. La aplicación de cargas produce esfuerzos de compresión y tensión en la carpeta asfáltica, evitando la rigidez y posterior aparición de fallas.

#### **1.1.4. Mantenimiento y rehabilitación de pavimentos**

En términos generales, sólo los pavimentos flexibles pueden ser reciclados *in-situ*. Los efectos del envejecimiento de la carpeta de rodadura se pueden corregir o ralentizar en forma efectiva si se realizan a tiempo los trabajos de mantenimiento. Si se presentan condiciones de tránsito severas, el mantenimiento puede resultar no tan efectivo y requerir un proceso de rehabilitación definido o un recapeo con capas adicionales de mezcla asfáltica. Para condiciones de tránsito bajo, el mantenimiento se puede dar por medio de un tratamiento superficial.

La figura 5 presenta un gráfico en donde se detallan las fases de la calidad de la rodadura típica. Muestra la efectividad del mantenimiento oportuno y de las medidas de rehabilitación.

Figura 5. **Gráfica de monitoreo de calidad de la carpeta de rodadura**



Fuente: Cold Recycling Manual, Wirtgen. p.23.

### 1.1.5. **Opciones de rehabilitación**

Existen diversas opciones para la rehabilitación de un camino deteriorado y en algunas oportunidades es difícil determinar cuál es la mejor. Sin embargo, es importante seleccionar las opciones más rentables desde el inicio del proyecto, de esta manera será mucho más fácil seleccionar la técnica correcta.

Realizar una inspección visual detallada, más algunos ensayos básicos a la estructura de pavimento, normalmente son suficientes para entender las razones del deterioro. La importancia de realizar esta inspección, es determinar si el deterioro se produce sólo en la superficie del pavimento o si existe un problema estructural. Es muy importante considerar las situaciones de tránsito,

condiciones de clima y disponibilidad de recursos que pueden tener una influencia significativa en la ejecución del proyecto.

Se ha comprobado, mediante la observación de varios proyectos de carreteras, que existen diversas opciones para la rehabilitación de un pavimento y de esta manera lograr que el mismo obtenga nuevamente un nivel de serviciabilidad aceptable. A continuación se mencionan algunas de estas opciones.

a) Rehabilitación superficial

Esta medida está dirigida básicamente cuando se cuenta con problemas de fallas en la carpeta asfáltica de rodadura y sellos superficiales, no cuando se presentan fallas en las capas subyacentes. Esta aplicación se realiza escarificando de 4 a 12 centímetros superficiales, dependiendo del espesor de la carpeta de rodadura y colocando capas nuevas de concreto asfáltico con espesores variables según los requerimientos estructurales del pavimento.

Los métodos comúnmente utilizados para tratar estos tipos de problemas son:

Recapeo asfáltico. Construcción de una capa nueva de concreto asfáltico, regularmente con espesores entre 4.0 a 5.0 centímetros colocada sobre la superficie existente. Esta representa una de las soluciones más simples en cuanto a rehabilitación superficial se refiere debido a que no es necesario remover la capa dañada y por consiguiente se reducen considerablemente los tiempos de trabajo, el impacto al usuario y el costo final del proceso es mínimo.<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup> Cold Recycling Manual, Wirtgen, Alemania 2004.

Fresar y reemplazar. Con este método es necesario remover la capa asfáltica deteriorada y luego reemplazarla con la construcción de una nueva, generalmente con un asfalto de diferentes características. El proceso resulta rápido si se cuenta con maquinaria en buenas condiciones y con alto rendimiento de fresado. El problema puede verse reducido o eliminado con la nueva capa de asfalto, tomando en cuenta la conservación de los espesores originales o la modificación de los mismos, en todo caso a espesores mayores que los originales.<sup>3</sup>

Reciclar una capa delgada de material asfáltico del pavimento existente. Es realizado en el mismo lugar de la obra *in-situ*, como una aplicación en caliente modificando o no las propiedades del reciclado mediante la adición de nuevos materiales o diferentes tipos de asfalto.

b) Rehabilitación estructural

Esta rehabilitación es específica para eliminar o corregir los problemas dentro de la estructura de pavimento, se entiende como una solución de largo plazo. Hay que tomar en cuenta que la estructura de pavimento a rehabilitar, es decir, la carpeta de rodadura asfáltica, la capa de base y la capa de sub-base, deben estar deterioradas o presentar serias deficiencias en alguna o todas ellas.

El objetivo primordial de la rehabilitación estructural, es la de obtener el máximo beneficio posible a partir de la estructura de pavimento existente. Es decir, trabajar adecuadamente las capas dañadas mediante procesos

---

<sup>3</sup> Cold Recycling Manual, Wirtgen, Alemania. Nov. 2004.

constructivos eficientes para evitar en lo posible, la sustitución de las mismas, generando un alto beneficio económico en el costo final del proyecto.

## **1.2. Criterios y procedimiento de diseño para pavimentos asfálticos (guía AASHTO 1993)**

La vida útil de un pavimento asfáltico está directamente relacionada con los criterios que se hayan utilizado al momento de diseñar la estructura de pavimento. Debido a esto es importante conocer los parámetros a utilizar según las especificaciones locales o aplicables en el lugar. En esta sección se detallarán los parámetros que utiliza la Guía para el Diseño de Estructuras de Pavimento de la AASHTO, la cual tiene como base los ensayos del “*road test*” realizados en Ottawa, Illinois por la *American Association of State Highway Officials* (AASHTO) y en algunos casos, aplicables en nuestro país.

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 pavimento y sus respectivos espesores.

Dentro de los factores a tomar en cuenta para el diseño de pavimentos flexibles, al utilizar la segunda edición del manual AASHTO 1993, se pueden mencionar los siguientes:

### **1.2.1. Tránsito y carga por eje**

Toda vez que se desea conocer el número de vehículos que pasan por un punto dado, se realizan estudios de volúmenes de tránsito, estos estudios



varían desde los más amplios en un sistema de caminos, hasta recuentos en lugares específicos tales como, puentes, túneles, etc. El tránsito está compuesto por vehículos de diferente peso y número de ejes, los cuales para efectos de diseño se convierten en un número equivalente de ejes tipo de 80 KN o 18 kips, los cuales se conocen por sus siglas en inglés como “ESAL”.

A continuación se presenta una tabla resumen general en la cual se muestra la información de la estructura vehicular, clase de vehículo, carga y tipo de eje.

Tabla I. **Clasificación de vehículos según su peso y número de ejes**

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: Reglamento para el Control de Pesos y Dimensiones de Vehículos Automotores y sus Combinaciones. Dirección General de Caminos. Acuerdo Gubernativo 1084-92.

Cuando se aprecia que los datos del tránsito resultan insuficientes para el adecuado diseño de la rehabilitación, es necesario obtener información adicional de conteos de tránsito. Se debe contabilizar el tránsito para obtener una estimación del porcentaje de vehículos pesados que circulan por el camino. Es necesario realizar predicciones del volumen y tipo de tránsito futuro, éstas se pueden obtener mediante cálculos estadísticos confiables o de las autoridades viales correspondientes. Siempre debe tenerse presente que la información utilizada para calcular el diseño de tránsito es dependiente del incremento del tránsito, factores de deterioro y otros datos que pueden no ser exactos.

### **1.2.2. Tasa de crecimiento**

La tasa de crecimiento del tránsito de un lugar específico, corresponde al incremento o decremento en relación a los conteos anuales que se efectúen. En el caso de que no se cuente con un historial de tránsito que permita definir estadísticamente el % de crecimiento y proyectar el tránsito futuro, es posible utilizar otros factores que ayuden a definirlo tales como: el crecimiento poblacional de la zona, el % de crecimiento del producto interno bruto de la región, etc. Además es importante establecer la necesidad de realizar conteos vehiculares después de construida la obra, con el fin de corroborar los cálculos efectuados y en el caso de ser necesario, aplicar políticas de refuerzo estructural y de mantenimiento.

### **1.2.3. Número de carriles**

El número de carriles para el diseño estructural, no es más que el número de pistas en cada dirección por donde circularán los vehículos. En el caso de que el número de pistas en el mismo sentido excedan de uno, la AASHTO define el factor de distribución de cargas para la realización del cálculo del

ESAL, en el caso de que el número de pistas por sentido sea uno normalmente, se utiliza el factor de dirección de 0.5; sin embargo existen casos en los que el peso de los vehículos puede estar moviéndose más en un carril que en el otro por lo que los conteos deberán de ser direccionales y el diseño estructural deberá de realizarse con el ESAL crítico para evitar construir una estructura de pavimento con diferentes niveles de cotas.

En la siguiente tabla se muestran algunos factores de carril aplicables según la cantidad de carriles en cada sentido.

Tabla II. **Tabla de factores por carriles en cada sentido**

<b>Número de carriles en cada sentido</b>	<b>Factor de distribución por carril</b>
<b>1</b>	<b>1.0</b>
<b>2</b>	<b>0.8 – 1.0</b>
<b>3</b>	<b>0.6 – 0.8</b>
<b>4 o más</b>	<b>0.5 – 0.75</b>

Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1993.<sup>4</sup>

#### **1.2.4. Ejes equivalentes “ESAL” (*Equivalent Single Axle Load*)**

Las cargas actuantes sobre un pavimento producen diferentes tensiones y deformaciones en el mismo, así como diferentes espesores de pavimentos y diferentes materiales responden de distinta manera a los efectos de una misma carga. Debido a esto, las fallas en el pavimento serán distintas por lo que el tránsito se reduce a un número equivalente de ejes de carga tipo de 80 KN o 18

---

<sup>4</sup> Tomada de la AASHTO 1993. Capítulo 2, Sección 2.1, sub-sección 2.1.2 (II-9).

kips, dicha transformación se lleva a cabo mediante el uso de los factores equivalentes de carga “LEF”.<sup>5</sup>

El factor equivalente de carga “LEF” es un valor numérico que expresa la relación entre la pérdida de serviciabilidad causada por una carga de un tipo de eje y la producida por el eje estándar de 80 KN en el mismo eje.

$$LEF = \frac{\text{No de ESALs de 80 kN que producen una pérdida de serviciabilidad}}{\text{No de ejes de x kN que producen la misma pérdida de serviciabilidad}}$$

Es necesario recalcar que el eje delantero no está incluido en los factores de equivalencia de carga, debido a que el daño producido por éste eje es mínimo.

#### **1.2.5. Características de la sub-rasante (Módulo de Resiliencia)**

Ensayos como el C.B.R. (*California Bearing Ratio*) y compresión simple, son a base de aplicar cargas estáticas o de baja velocidad de deformación. En nuestro país, el ensayo de C.B.R., sigue siendo el más utilizado debido a que se lleva a cabo con equipo que comúnmente se dispone en los laboratorios de suelos, por lo tanto el diseño mediante este valor se basa en que, a menor valor de CBR del suelo de sub-rasante, mayores serán los espesores que requerirá la estructura de pavimento para protegerlo de los efectos del tránsito. El cálculo del módulo resiliente por medio del CBR, según la guía AASHTO '93, se obtiene de la siguiente forma:

$$M_R = B * CBR$$

---

<sup>5</sup> American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993.

Donde  $B = 1500$  si  $CBR < 10\%$ , este valor puede variar entre 750 a 3000 para  $M_R$  en psi.

Ahora bien, en la Guía AASHTO 2002 se propone lo siguiente:

$$M_R = B * CBR^{0.64}$$

Donde  $B = 2555$  para cualquier valor de CBR.

### **1.2.6. Clima y drenaje**

La presencia del agua juega un papel importante en el diseño de pavimentos y debido a esto se han incluido coeficientes de drenaje que afectan a los materiales a utilizar para la base y sub-base. La humedad ejerce una gran influencia sobre las propiedades de los materiales que constituyen la estructura de pavimento. Se ha determinado que con un drenaje eficiente se aumenta la capacidad portante de la sub-rasante, esto debido a que el módulo resiliente aumenta cuando la humedad disminuye.

En la tabla que se muestra a continuación, se dan los tiempos de drenaje recomendados por la AASHTO, basándose en el tiempo requerido por la capa de base para drenar hasta un grado de saturación del 50%.<sup>6</sup>

---

<sup>6</sup>Morales, Carlos Arnoldo. "Control de calidad en la evaluación de pavimentos asfálticos existentes". USAC 2007.

Tabla III. **Tiempos y coeficientes de drenaje recomendados por AASHTO.**

CALIDAD DE DRENAJE	50% DE SATURACIÓN EN:	% DE TIEMPO EN QUE EL PAVIMENTO ESTÁ EXPUESTO A NIVELES DE HUMEDAD PRÓXIMOS A LA SATURACIÓN			
		< 1%	1% - 5%	5% - 25%	> 25%
Excelente	2 Horas	1.40 - 1.35	1.35 - 1.30	1.30 - 1.20	1.2
Bueno	1 Día	1.35 - 1.25	1.25 - 1.15	1.15 - 1.00	1.0
Regular	1 Semana	1.25 - 1.15	1.15 - 1.05	1.00 - 0.80	0.8
Pobre	1 Mes	1.15 - 1.05	1.05 - 0.80	0.80 - 0.60	0.6
Muy pobre	El agua no drena	1.05 - 0.95	0.95 - 0.75	0.75 - 0.40	0.4

Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1993.

### 1.2.7. Coeficientes estructurales

Estos coeficientes son un indicativo de la capacidad relativa de cada capa como componente estructural de un pavimento.

### 1.2.8. Determinación de los coeficientes de capa

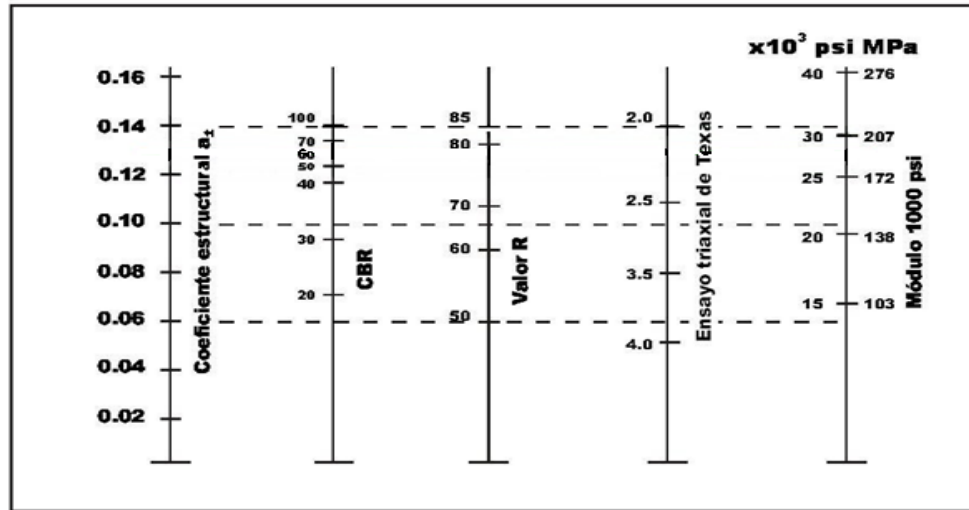
#### a) Capa de sub-base

Para la determinación del coeficiente estructural de la capa de sub-base, se debe aplicar la siguiente fórmula propuesta por AASHTO.

$$A_3 = 0.227 * (\log_{10} E_{SB}) - 0.839$$

El módulo de elasticidad de la capa se tomará de acuerdo a los resultados de los ensayos de laboratorio efectuados.

Figura 6. **Determinación de coeficiente estructural de sub-base**



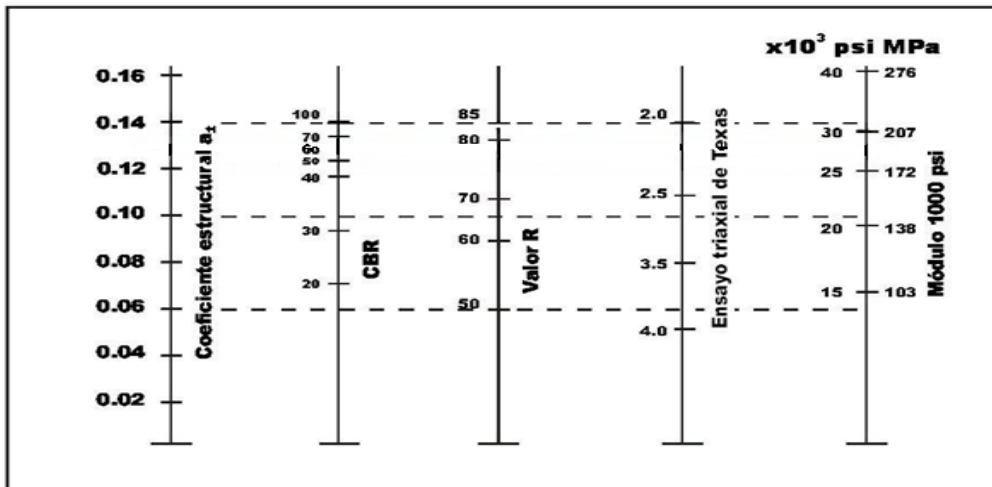
Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1993.

b) Capa de base

Aplicando la siguiente fórmula propuesta por AASHTO se tiene:

$$A_2 = 0.249 * (\log_{10} E_{SB}) - 0.997$$

Figura 7. Determinación de coeficiente estructural de base



Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1993.<sup>7</sup>

c) Capa de concreto asfáltico

Para el cálculo del módulo de elasticidad se utilizará la siguiente ecuación:

$$E_{AC} = 860 \cdot (P/f) \times 10^{0.035(30-T)}$$

Donde:

E<sub>AC</sub> en MPa

P = Estabilidad Marshall en KN

f = Fluencia en mm

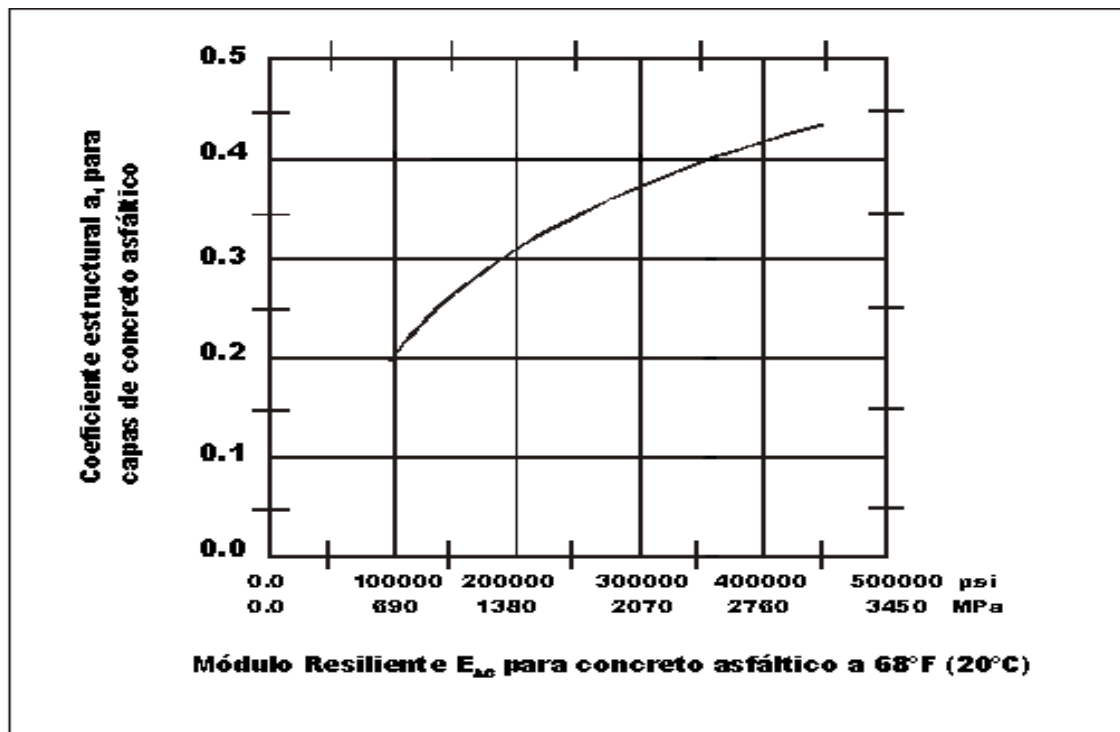
T = Temperatura (para el cálculo se hará con T = 25°C)

<sup>7</sup> AASHTO, ed. 1993. Basados en la figura 2.7 de la sección II-22.



Con base en la figura 2.5 de la sección II.18 de la Guía Interina de la AASHTO, se obtiene un coeficiente de capa variable de acuerdo al módulo de elasticidad del concreto asfáltico (módulo de elasticidad entre 250,000 y 500,000).

Figura 8. **Determinación de coeficiente estructural de capa de rodadura asfáltica**



Fuente: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1993.<sup>8</sup>

<sup>8</sup> AASHTO, ed. 1993. Basados en la figura 2.7 de la sección II-22.

### **1.2.9. Período de diseño**

Es el período en el cual la estructura de pavimento deberá estar preparada para soportar las cargas impuestas por el tránsito. Es importante establecer que para alcanzar el período de diseño es necesario realizar el mantenimiento adecuado a la estructura verificando en todo momento el buen funcionamiento del sistema de drenaje.

### **1.2.10. Nivel de servicio**

El nivel de servicio o serviciabilidad de un pavimento puede definirse como el estado físico en el que se encuentra la estructura de pavimento. La AASHTO define al índice de serviciabilidad presente utilizando parámetros de calificación entre 0 y 5, donde 0 significa que el pavimento se encuentra en pésimas condiciones y 5 significa que el pavimento está en perfecto estado.<sup>9</sup>

### **1.2.11. Confiabilidad**

Corresponde a la probabilidad (expresada en porcentaje) de que la estructura de pavimento cumpla la función prevista dentro de su período de vida útil bajo las condiciones climáticas del lugar. La confiabilidad debe ser mayor cuanto más importante sea la carretera y mayor el volumen de tránsito. Se consideran valores apropiados entre 0.80 y 0.99 para carreteras de la red principal urbana y rural.

Así mismo, la AASHTO propone la siguiente fórmula para el cálculo de la confiabilidad.

---

<sup>9</sup> American Association of State Highway and Transportation Officials. 1993.

$$R(\%) = 100 * P(N_t > N_T)$$

Donde:

$N_t$  = # de Esal's de 80 KN que inducen al pavimento a su serviciabilidad final

$N_T$  = # de Esal's de 80KN previstos que circularán sobre el pavimento

### **1.2.12. Desviación estándar**

La varianza  $(DS)^2$  del comportamiento de la estructura de pavimento y del tránsito estimado en el periodo de diseño, pueden ser determinados para un caso de diseño en particular si se dispone de suficiente información o en caso contrario se pueden utilizar los valores sugeridos por la AASHTO para pavimentos flexibles:

$$0.44 \leq \text{Desviación Estandar} \leq 0.49$$

Dichos valores fueron desarrollados a partir de un análisis de varianza que existía en el AASHTO *Road Test* donde se tomaba en cuenta el grado de error cometido a la hora de estimar el tránsito en el período de diseño, de tal forma que a mayor error estimado mayor el valor de la desviación estándar, a menor error estimado menor el valor de la desviación estándar a utilizar.

### **1.2.13. Determinación del número estructural**

El método de diseño AASHTO 1993 utiliza la siguiente ecuación de diseño:

$$\log W_{18} = Z_R S_o + 9.36 \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log \Delta PSI}{\frac{0.40 + 1094}{(SN+1)^{5.19}}} + 2.32 \log M_R - 8.07 \quad 10$$

Donde:

SN = Número estructural en pulgadas

$W_{18}$  = Número de cargas de 18 kips previstas

$Z_R$  = Abscisa correspondiente a un área igual a la confiabilidad R en la curva de distribución normalizada

$S_o$  = Desviación estándar de todas las variables.

$\Delta PSI$  = Pérdida de serviciabilidad.

$M_R$  = Módulo resiliente de la sub-rasante en psi (*pound square inch*)

Con esta ecuación se obtiene el número estructural (SN) y en función de él se determinan los espesores de capa que conformarán la estructura de pavimento. El número estructural (SN) está directamente relacionado con los espesores de capa mediante la ecuación siguiente:

$$SN = a_1 m_1 D_1 + a_2 m_2 D_2 + a_3 m_3 D_3$$

Donde:

$a_1$  = Coeficiente de diseño capa de rodadura

$D_1$  = Espesor en pulgadas de la capa de rodadura

$C_1$  = Coeficiente de drenaje capa rodadura

---

<sup>10</sup> American Association of State Highway and Transportation Officials. 1993.

$a_2$  = Coeficiente de diseño capa de base triturada o base negra

$D_2$  = Espesor en pulgadas de la capa de base triturada o base negra

$C_2$  = Coeficiente de drenaje capa de base triturada.

$a_3$  = Coeficiente de diseño capa de sub-base

$D_3$  = Espesor en pulgadas de la capa de sub-base

$C_3$  = Coeficiente de drenaje capa de sub-base



## **2. PROCEDIMIENTO A SEGUIR EN LA EVALUACIÓN DE UN PAVIMENTO ASFÁLTICO**

Como se describe en la primera parte, cuando un camino pavimentado es diseñado apropiadamente y es constantemente protegido con mantenimientos rutinarios y recapeos, la necesidad de rehabilitación estructural puede minimizarse considerablemente. Sin embargo, en muchos casos, el mantenimiento requerido no se realiza con frecuencia, haciendo necesaria la rehabilitación tan pronto como sea pronosticada.

Es importante realizar una evaluación exhaustiva del pavimento para determinar el tipo de rehabilitación que se requiere y conocer si en el momento de la evaluación cumple con alguno de los parámetros con el que fue diseñado y la proximidad a su condición final.

Con base en la experiencia, se ha podido determinar que el procedimiento de evaluación puede variar según el diagnóstico del profesional que lo realice y de la disponibilidad de recursos materiales y económicos con que se cuente. La evaluación del pavimento comienza desde la visita de campo del tramo para determinar las áreas a rehabilitar y determinar el tipo y cantidad de fallas que se presentan en el pavimento; identificar los aspectos negativos que influyen en la disminución de la capacidad soporte de cada capa del pavimento asfáltico como lo son: presencia de humedad, falta de drenaje o sub-drenajes, aumento del tránsito en mayor número que el proyectado en el diseño de pavimento original.

A continuación se muestran algunos de los pasos básicos de recolección de información para la realización del diseño de pavimento para la rehabilitación.

## **2.1. Inspección visual**

Con base en la experiencia obtenida, se ha determinado que deben realizarse las visitas de campo que sean necesarias para evaluar correctamente la superficie de rodadura del tramo e identificar las fallas existentes en el pavimento. Es importante tomar en cuenta el clima preponderante de la región y realizar un estudio de los cambios climáticos que hayan afectado recientemente el área para determinar si estos corresponden a efectos aislados y si los mismos pudieran repetirse en el futuro con la misma o mayor intensidad.

## **2.2. Pozos a cielo abierto**

Es uno de los métodos utilizados comúnmente en nuestro país para la evaluación de la estructura de pavimento y de la sub-rasante existente en un tramo a construir o rehabilitar.

Los pozos a cielo abierto (calicatas) en un pavimento existente, son una de las partes más importantes en una evaluación de pavimento, ya que por medio de ellos se pueden determinar los espesores de capas y tomar una idea del problema que ocasiona los daños en la estructura de pavimento y definir las opciones de rehabilitación. Existen métodos modernos para conocer las condiciones de las capas que conforman la estructura de pavimento, pero con los pozos a cielo abierto se logra tener una apreciación visual útil de las capas y materiales que poseen las mismas, además, los pozos a cielo abierto proporcionan la oportunidad de tomar muestras de cada capa existente para



realizarles los ensayos de laboratorio que correspondan, evaluar la calidad de los materiales y que los resultados puedan ser utilizados para establecer los tratamientos más efectivos para la estructura.

Los pozos a cielo abierto también permiten determinar el espesor de las capas individuales del pavimento, el estado físico y mecánico de estas capas y su comportamiento dentro de la estructura de pavimento.

La profundidad del pozo puede variar entre 80 a 120 centímetros, la cual puede aumentar de encontrarse algún relleno estructural. Es necesario profundizar hasta encontrar la capa de sub-rasante del lugar.

### **2.3. Muestreo de las distintas capas**

El muestreo de la estructura de pavimento se inicia tomando una muestra representativa de la carpeta de rodadura, se mide el espesor de la misma y se almacena adecuadamente para transportarla al laboratorio y analizar sus propiedades mecánicas, este mismo procedimiento es necesario para la toma de muestras de base y sub-base.

Al momento de encontrar la sub-rasante, se debe retirar el material sobrante de las capas anteriores, limpiar y extraer suficiente material para evaluar sus características mediante ensayos de laboratorio.

A continuación se muestra el ejemplo de un pozo a cielo abierto terminado, del cual se extraen los materiales de la estructura de pavimento.

**Figura 9. Pozo a cielo abierto**



Fuente: proporcionada por empresa Concal. Muestreo del Proyecto M-72-2009.  
Diciembre 2009. VARC.

#### **2.4. Ensayos de laboratorio utilizados en el control de calidad**

Los ensayos de laboratorio realizados a las muestras de las capas que componen la estructura de pavimento, juegan un papel primordial para la determinación de las causas que provocaron el deterioro del pavimento o la aparición de las fallas y consecuentemente, definir las soluciones que se consideren aptas para la rehabilitación de la carretera.

A continuación se mencionan brevemente los ensayos de laboratorio que comúnmente se realizan a los materiales.

a) Granulometría

El análisis granulométrico de un suelo consiste en separar y clasificar por tamaños los granos que lo componen, expresado en porcentaje de peso respecto al peso total de la muestra analizada.

El análisis se puede realizar de dos formas: la primera, por medio de una serie de tamices para tamaños grandes y medianos de las partículas, o sea las llamadas granulometrías gruesa y fina, y la segunda, por medio de un proceso de vía húmeda para granos finos (material que pasa el tamiz No. 200).<sup>11</sup>

b) Límites de consistencia

Las propiedades plásticas de los suelos arcillosos o limosos pueden ser estudiadas apropiadamente por medio de pruebas simples. Las más usuales se denominan límites de consistencia o de Atterberg. Esto en honor al científico sueco A. Atterberg que propuso cinco límites de los cuales tres son los más utilizados en la ingeniería vial, los cuales son: límite líquido (L.L.), límite plástico (L.P.) y límite de contracción (L.C.), estos con contenidos de humedad típicos del suelo.

Como es bien sabido, la plasticidad es la propiedad de los suelos de poder deformarse hasta cierto límite sin romperse. Para determinar estos límites se debe utilizar suelo que pase el tamiz No. 40.<sup>12</sup>

---

<sup>11</sup> Anckermann Alvarez, Enrique. "Manual para laboratoristas de suelos en construcción de carreteras". p.151.

<sup>12</sup> Anckermann Alvarez, Enrique. p.156.

Límite líquido: es la capacidad del suelo de absorber agua, dicho de otra manera, se define como el contenido de agua o porcentaje de humedad, para un material dado, que fija la división entre el estado casi líquido y el estado plástico.<sup>13</sup>

Límite plástico: corresponde al punto en el cual el suelo posee una cantidad de humedad tal que puede amasarse en cilindros de tres milímetros de diámetro sin llegar a resquebrajarse ni desmenuzarse. Es el contenido de humedad expresado en porcentaje con respecto al peso seco de la muestra de suelo que pasa el tamiz No. 40 secada al horno, para el cual los suelos cohesivos pasan de un estado semisólido a un estado plástico.

A la diferencia entre el valor de límite líquido y el valor del límite plástico se le llama índice de plasticidad.<sup>14</sup>

c) Humedad óptima y densidad máxima (Próctor)

Con este ensayo se busca determinar el porcentaje de humedad óptima que debe ser aplicado al suelo al compactarlo para lograr obtener su densidad máxima. Para realizar el ensayo, se utiliza la muestra de suelo que pasa por el tamiz No. 4, o que como máximo tenga un retenido del 10% en dicho tamiz siempre y cuando éste retenido pase totalmente por el tamiz de 3/8".<sup>15</sup>

---

<sup>13</sup> Anckermann Alvarez, Enrique. "Manual para laboratoristas de suelos en construcción de carreteras". p.157.

<sup>14</sup> Anckermann Alvarez, Enrique. p.163.

<sup>15</sup> Anckermann Alvarez, Enrique. p.168.

d) Valor Soporte California C.B.R. (*California Bearing Ratio*)

Nos sirve como indicativo de la resistencia al esfuerzo cortante que posee un suelo bajo condiciones de densidad y humedad controladas.

El *California Bearing Ratio* (C.B.R.) lo podemos expresar como porcentaje del esfuerzo requerido para penetrar un pistón en el suelo a ensayar, el cual se relaciona con el esfuerzo que se requiere para penetrar el mismo pistón, a la misma profundidad de una muestra patrón, la cual es de una piedra triturada bien graduada. Este ensayo es de suma importancia ya que proporciona una idea de la resistencia de los suelos y es el que comúnmente se utiliza para la realización de los diseños estructurales de pavimentos.<sup>16</sup>

e) Densidad de campo (% de compactación)

Este ensayo proporciona un medio para comparar las densidades secas en obras en construcción con las obtenidas en el laboratorio. Para ello se tiene que la densidad seca obtenida en el campo se fija con base en una prueba de laboratorio. Al peso unitario seco del suelo obtenido se le conoce también como la densidad de campo.

Para la determinación del porcentaje de compactación del suelo se debe dividir el peso unitario seco obtenido sobre el peso unitario seco máximo obtenido del ensayo de Próctor de esta forma:<sup>17</sup>

---

<sup>16</sup> Morales, Carlos Arnoldo. "Control de calidad en la evaluación de pavimentos asfálticos existentes". p.30.

<sup>17</sup> Morales, Carlos Arnoldo. p.32.

$$\% \text{ de compactación} = \frac{\text{Peso Unitario Seco de la muestra excavada}}{\text{Peso Unitario Seco máximo de la muestra excavada}}$$

f) Equivalente de arena

El ensayo consiste en llenar una probeta con agua destilada y el suelo a ensayar, se agita en 90 ciclos de ida y vuelta, luego se deja reposar por 20 minutos, tomando lecturas de caídas de los finos a cada dos minutos para las arcillas y de un minuto para las arenas; al llegar a los 20 minutos se determina el nivel de la superficie de arcilla, luego se introduce una varilla con la cual se medirá la altura de pie determinada por el punto donde se encuentra la superficie de arena con el objeto de medir el nivel de material granular. El equivalente de arena se expresa en porcentaje.

g) Abrasión (% de desgaste)

El ensayo de abrasión o desgaste es conocido también como ensayo en máquina de los ángeles. Este ensayo consiste en colocar una muestra con una granulometría determinada del agregado a ensayar dentro del tambor cilíndrico de acero que está montado horizontalmente en dicha máquina. Se añade un número determinado de esferas de acero, dependiendo del tamaño máximo del agregado con el que se cuente. Las especificaciones nacionales, cuando el agregado va a ser utilizado para carreteras, requieren que el ensayo se realice a 500 revoluciones. El agregado sufre desgaste al chocar con las esferas de acero, y éste se calculará haciendo una diferencia de pesos de la muestra original y la obtenida después del ensayo expresando el resultado en porcentaje.

#### h) Desintegración al sulfato

Por medio de este ensayo podemos medir la resistencia de determinado agregado a la acción de los sulfatos, se puede determinar la alteración física y química que pueden sufrir los agregados cuando están expuestos al ambiente. Este ensayo se puede realizar con sulfato de sodio o sulfato de magnesio.<sup>18</sup>

#### i) Partículas planas y alargadas

Son partículas planas y alargadas, las partículas con una longitud mayor de cinco veces el espesor promedio de dichas partículas. Para un material de sub-base o base granular, no más del 25% en peso del material retenido en el tamiz No. 4 pueden ser partículas planas o alargadas, para un material de sub-base o base triturada, no más del 20% y, para el agregado grueso componente de una mezcla asfáltica en caliente, no más del 8%.<sup>19</sup>

### **2.5. Interpretación de los resultados de laboratorio obtenidos**

Al haber obtenido los resultados de laboratorio de las muestras ensayadas, se compilan los datos para visualizarlos de mejor manera y formar el criterio de evaluación y determinar las acciones a tomar. Dependen mucho del criterio del diseñador las acciones que se traduzcan en la rehabilitación del pavimento.

---

<sup>18</sup> Morales, Carlos Arnoldo. Control de Calidad en la Evaluación de Pavimentos Asfálticos Existentes. p.36.

<sup>19</sup> Libro de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes, D.G.C. 2001. División 400, Sección 401. 401-1.

Los pozos a cielo abierto nos dan la opción de formar un perfil estratigráfico del suelo del lugar y consecuentemente con los diferentes puntos muestreados se puede realizar una correlación estratigráfica de la ruta, con lo que se pueden determinar los cambios que pudieran darse en los espesores de capa de la estructura de pavimento.

La granulometría del suelo y/o mezcla de agregados, deben cumplir con lo indicado en las disposiciones especiales propuestas en las especificaciones generales o especificaciones técnicas del proyecto. Si en la granulometría existe exceso en cantidad de granos finos y/o granos gruesos, puede provocar que la mezcla tenga menos resistencia, exceso o falta de vacíos, segregaciones, etc., esto a la hora de utilizar el material como componente en una mezcla asfáltica, si se utiliza como base o sub-base, puede existir migración de finos a otras capas, que su estructura granulométrica esté descompensada y fuera de especificaciones, baja en su valor soporte, etc.

Los límites líquido y plástico son muy importantes debido a que definen el intervalo de humedades dentro del cual el suelo puede ser amasado. Mediante la diferencia entre el valor de límite líquido y el límite plástico, obtenemos el valor del índice de plasticidad. La importancia de estos valores es tal debido a que el límite líquido nos da una idea de la capacidad que tiene el suelo de absorber agua, mientras que el límite plástico indica la presencia de arcilla en el suelo, sabiendo que, la arcilla por su alta plasticidad, es sumamente perjudicial en una estructura de pavimento debido a los cambios volumétricos que experimenta al entrar en contacto con el agua.



Con los resultados del ensayo de Próctor se define la humedad óptima (cantidad de agua) que requiere el suelo para lograr una máxima compactación, por lo que se debe realizar una medición correcta de la cantidad de agua aplicada al momento de la construcción, ya que si hay exceso de humedad o baja de la misma, la densidad se reducirá considerablemente disminuyendo el porcentaje de compactación.

Es de suma importancia tomar en cuenta que el valor de C.B.R. nos ayuda a encontrar el valor del módulo de resiliencia de la sub-rasante, mediante las ecuaciones indicadas anteriormente. Éste módulo es fundamental en el diseño de estructuras de pavimentos. Con el valor de C.B.R. obtenemos una idea de la resistencia de los suelos de fundación para el pavimento y además nos indica el comportamiento de los cambios volumétricos en suelos plásticos.

Determinar la densidad de campo es un ensayo fácil y rápido de obtener, que tiene como objetivo comparar las densidades secas de las capas colocadas en la obra con respecto a las densidades obtenidas en el laboratorio. Esto es esencial para conocer si se está cumpliendo con los requisitos de compactación del suelo. Regularmente se exige un 95% de compactación en las capas de la estructura de pavimento.

Con el ensayo de equivalente de arena, podemos formar un criterio del porcentaje relativo de materiales finos plásticos (arcillas) que contiene el suelo ensayado y la cantidad de arena que posee. En algunas especificaciones, para la sub-base y base granular, el resultado de este ensayo no debe ser menor de 30.

El ensayo de abrasión o desgaste nos permite conocer la durabilidad y resistencia que tendrá el agregado grueso contenido en la mezcla asfáltica. Dependiendo del valor del resultado, sabremos si el agregado es apto para utilizarse como componente en una mezcla.

El ensayo de resistencia de los agregados a la acción de los sulfatos, nos sirve para determinar la alteración que pueden sufrir los agregados cuando estén expuestos al ambiente. Pueden ocurrir alteraciones físicas y químicas en el agregado por acción del viento, del sol u otro agente externo presente naturalmente, esto puede verse incrementado en proyectos cercanos a mares u otros lugares que tengan presencia en el ambiente de sulfatos.

Se ha podido comprobar mediante el análisis de los agregados, que la forma de las partículas incide de tal manera, que afectan la resistencia y la respuesta de la mezcla asfáltica a los procesos de compactación. Este aspecto debe ser medido desde el inicio de la producción de los agregados que servirán como componentes de la mezcla asfáltica a utilizar en el proyecto. Limitando las partículas alargadas nos aseguramos que los agregados tendrán mayor resistencia a fracturarse durante el manipuleo.

## **2.6. Especificaciones más usadas de los materiales que conforman la estructura del pavimento asfáltico**

Las especificaciones más utilizadas en Guatemala son las contenidas en el Libro de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes, de la Dirección General de Caminos, edición 2001. Este libro de especificaciones se encarga de establecer los límites, en este caso, de los materiales utilizados y a utilizar para la conformación de una estructura de

pavimento. Dentro de él podemos encontrar varias secciones que contienen especificaciones para diversas actividades constructivas y para materiales a utilizar en dichas actividades, por ejemplo, requerimientos del proyecto, movimiento de tierra, terraplenes estructurales, especificaciones para los materiales componentes de las sub-bases y bases, mezclas asfálticas, concretos hidráulicos, sub-drenajes, cabezales, formas de pago, asfaltos, cantidades de ensayos de laboratorio por área y por volumen, etc.

Se debe tener presente que estas especificaciones, como todas, proporcionan únicamente los lineamientos a seguir, sin embargo, es importante que el profesional forme un criterio personal al encontrar variaciones salvables.

Según la experiencia, en la mayor parte de proyectos, debido a la naturaleza particular de cada uno de ellos es común encontrar “Especificaciones Técnicas Especiales”, las cuales serán las que fijen los requisitos mínimos o intervalos con los que deben cumplir algunas de las actividades que se realicen en el mismo, éstas especificaciones son propuestas por los diseñadores del proyecto y pueden estar derivadas de otras especificaciones existentes.



### **3. FALLAS EN LOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS**

Con base en la experiencia, se ha observado que cualquier tipo de pavimento, con el paso del tiempo y debido a efectos internos y externos, sufre cierta degradación que hace que el mismo disminuya su funcionalidad y baje el nivel de serviciabilidad del mismo. Los pavimentos sufren daños desde el proceso de su construcción, por lo que se deben tomar en cuenta los pasos que forman parte de dicho proceso y mantener un estricto control de calidad de los mismos.

El control de calidad puede realizarse obteniendo muestras de las capas componentes del pavimento y determinando sus propiedades físicas y mecánicas en base a ensayos de laboratorio, realizados *in-situ*, es decir, en el mismo lugar del proyecto y como soporte, en un laboratorio de suelos externo.

En un pavimento asfáltico regularmente se pueden presentar dos clases de fallas; la primera es de tipo estructural, ya que en ella se produce un colapso de la estructura del pavimento o de uno o más de sus componentes, lo que los hace incapaces de soportar las cargas impuestas por el tránsito. La segunda es la falla funcional (puede estar acompañada de la falla estructural) que es tal, que causa grandes esfuerzos sobre los vehículos que transitan, ocasionando incomodidad al usuario debido a la alta rugosidad que presenta.

### 3.1. Tipos de fallas

Algunas de las principales fallas que se originan en un pavimento asfáltico son las siguientes:

#### a) Grietas por fatiga

Conocidas comúnmente en el ámbito ingenieril de carreteras como grietas “piel de cocodrilo”. Son conjuntos de fisuras o grietas conectadas entre sí, las cuales forman trozos de ángulos agudos asemejando la piel de un cocodrilo. Generalmente este tipo de falla ocurre cuando la capa de asfalto se fatiga por el sometimiento de cargas repetitivas producto de las cargas de tránsito.

Estas fisuras también pueden producirse debido a altas deflexiones en la rodadura que la carpeta asfáltica es incapaz de absorber, así como por la mala calidad de los materiales utilizados en las capas subyacentes de la estructura de pavimento, en otras palabras, deficiencia estructural.

#### b) Fisuras en bloque

Son fallas de forma similar a las fallas por fatiga del pavimento, diferenciándose de ellas en que éstas forman polígonos irregulares de mayor tamaño. Estas fisuras, como su nombre lo dice, en su conjunto obtienen la forma de un bloque con piezas aproximadamente rectangulares con lado promedio mayor de 30 centímetros.

c) Fisuras transversales

Son fallas que recorren el pavimento en forma casi perpendicular a la línea central del camino, pueden originarse por una mala construcción cuando se encuentran a lo largo del eje, por debilidad de la base cuando coinciden con la huella de paso de los vehículos y por contracciones térmicas cuando su posición es otra, exceso de filler o agregado fino en la mezcla asfáltica, en ocasiones puede ocurrir en pavimentos asfálticos tendidos sobre pavimentos hidráulicos o bien sobre bases estabilizadas muy rígidas, regularmente con exceso de cemento.

d) Fisuras longitudinales

Van en forma paralela al eje de la carretera. Algunas de las causas pueden ser las mismas que para las fisuras transversales y por el deficiente confinamiento lateral por falta de hombros y bordillos que provocan el debilitamiento del pavimento. Están relacionadas con las cargas del tránsito.<sup>20</sup>

e) Ahuellamiento

Hundimiento longitudinal continuo a lo largo de la superficie de rodadura, causada por las repeticiones de las cargas de tránsito que conducen a deformaciones permanentes en cualquiera de las capas de la estructura de pavimento. También puede existir ahuellamiento debido al exceso de bitumen o asfalto en la mezcla, la cual, principalmente en zonas cálidas, hace que la carpeta asfáltica sea altamente flexible y deformable.

---

<sup>20</sup> Morales, Carlos Arnoldo. "Control de calidad en la evaluación de pavimentos asfálticos existentes". p.41.

f) Hinchamiento

Abultamientos localizados en la superficie del pavimento, generalmente presentan la forma de una onda que distorsiona el perfil de la carretera. Su causa principalmente es por medio del hinchamiento de los suelos de subrasante al entrar en contacto con agua debido a su alta plasticidad, en algunos casos se presenta acompañado por la aparición de fisuras en la superficie. También se presentan promontorios en la superficie cuando la mezcla asfáltica se deforma debida normalmente al exceso de bitumen.<sup>21</sup>

g) Bache

Cuando se produce una desintegración total de la superficie de rodadura que, en ocasiones puede extenderse a otras capas del pavimento. Los baches en una carretera pueden resultar del conjunto de varios factores los cuales son: espesores insuficientes, defectos constructivos, filtración y retención de agua; en áreas donde presentan falla piel de cocodrilo con severidad, provocando la desintegración y posterior pérdida de parte de la superficie del pavimento.<sup>22</sup>

A continuación se muestra una tabla que puede servir de guía para determinar el tipo de deterioro del pavimento.

---

<sup>21</sup> Morales, Carlos Arnoldo. "Control de calidad en la evaluación de pavimentos asfálticos existentes". p.43.

<sup>22</sup> Morales, Carlos Arnoldo. p.44.



Tabla IV. **Modos y tipos de deterioro del pavimento**

Deterioro observado	Tipo de deterioro	Descripción
Daño superficial	Daño ambiental	Pérdida de áridos superficial, daño por oscilación térmica.
	Daño al tránsito	Pérdida de áridos superficial, exudación, pulido.
Daño estructural	Deformación	Ahuellamiento
	Agrietamiento	Longitudinal, piel de cocodrilo, etc.
	Daño avanzado	Baches, desprendimiento del borde
Condición funcional	Drenaje	Erosión
	Calidad de rodado	Ondulaciones, corrugaciones

Fuente: Cold Recycling Manual, Wirtgen 2004. p.46.

Para entender de mejor manera las fallas, se muestran algunas de ellas encontradas en carreteras de Guatemala.

Figura 10. **Fisuras piel de cocodrilo**



Fuente: empresa Concal. VARC. Carpeta de rodadura antes de su rehabilitación.

Proyecto: San Lucas Tolimán - Godínez, Sololá.

Figura 11. **Fallas de ahuellamiento y corrimiento**



Fuente: empresa Concal. VARC. Carpeta de rodadura antes de su rehabilitación.  
San Bernardino, Suchitepéquez.

### **3.2. Posibles causas**

La acumulación de esfuerzos de tracción provocados por el paso repetido de vehículos pesados en el pavimento, dan origen a las fisuras que con el tiempo fracturan la carpeta de rodadura debilitando la estructura de pavimento y permitiendo el paso del agua a las capas inferiores, todo esto repercute en la capacidad soporte de las mismas y permite la aparición de deformaciones permanentes. Esta situación se agrava cuando las capas inferiores cuentan con un nivel de plasticidad elevado, lo que ocasiona que la reflexión de esfuerzos no se realice de manera adecuada. Así mismo, los espesores de capa, los materiales usados en la conformación de cada capa y el proceso constructivo, juegan un papel primordial en la vida útil de la estructura de pavimento. Cuando el deterioro está ligado a estos factores, se les llama factores pasivos.

Los factores activos son los principales responsables del deterioro en el pavimento, estos van desde el tránsito que circula hasta los factores ambientales que predominan en el lugar.

### **3.3. Recomendación de soluciones**

Las alternativas para corregir las fallas presentes en la carpeta de rodadura o en la estructura de pavimento, pueden variar según el nivel de deterioro que presenten y debe hacerse una evaluación profunda de campo estudiando el entorno y la forma física de la falla, escogiendo la opción más adecuada técnica y económicamente. A continuación se presentan una serie de alternativas para solucionar deficiencias en el pavimento.

Cuando se tienen grietas por fatiga (piel de cocodrilo), una opción puede ser escarificar la carpeta de rodadura existente y colocar una carpeta de rodadura con nuevos materiales o materiales reciclados. Este tratamiento también puede aplicarse para las fallas en bloque. En el caso de que las capas subyacentes se encuentren afectadas será necesaria su reposición.

Para las fisuras longitudinales, es necesario verificar la existencia de asentamientos del lado del talud, en el caso de no existir, solamente será necesario efectuar el sellado de la grieta, en el caso de existir asentamiento será necesario reponer el material de relleno del talud engrapándolo adecuadamente con la estructura de pavimento. Si se tienen fisuras transversales con severidad media se puede aplicar un sello asfáltico, y para un nivel de severidad alto, es necesario realizar la sustitución de la carpeta de rodadura.

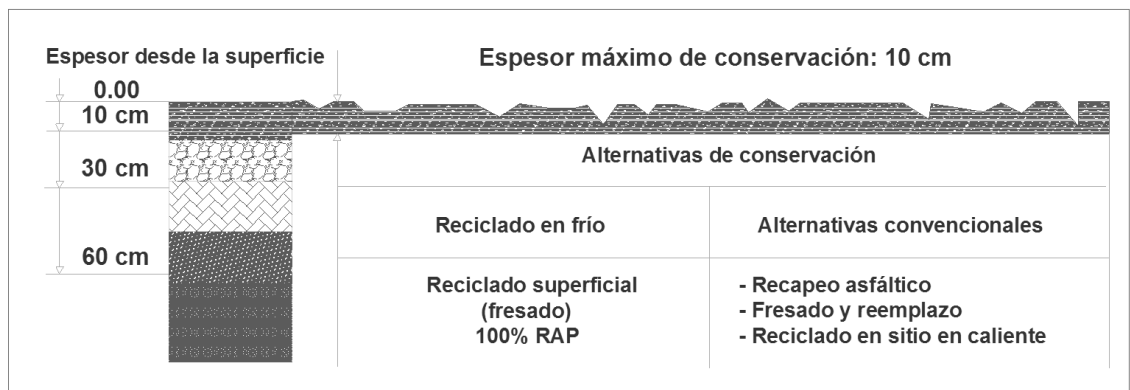
Si las fallas son por ahuellamiento, hinchamiento (deformaciones en la superficie de rodadura) será necesario revisar las capas inferiores para comprobar su estado; en el caso de que se encuentren dañadas se realizará su sustitución y en el caso de que sea solamente la rodadura se trabajará como un bacheo normal.

Para los baches con exposición de capa de base, las soluciones pueden ser desde un bacheo profundo hasta la sustitución de la estructura de pavimento completa, alguna de sus capas o la estabilización con cemento o cal. En este caso el reciclado de materiales es una buena opción ya que si se agrega algún tipo de agente estabilizador, aumentará su resistencia considerablemente. El objetivo del reciclado es recuperar la mayor cantidad de material del pavimento existente. Además de recuperar el material en las capas superiores del pavimento existente, la estructura de pavimento que se encuentra a mayor profundidad del nivel de reciclado permanecerá en su condición inicial.

#### 4. OPCIONES PRELIMINARES DE DISEÑO EN LA REHABILITACIÓN DE PAVIMENTOS

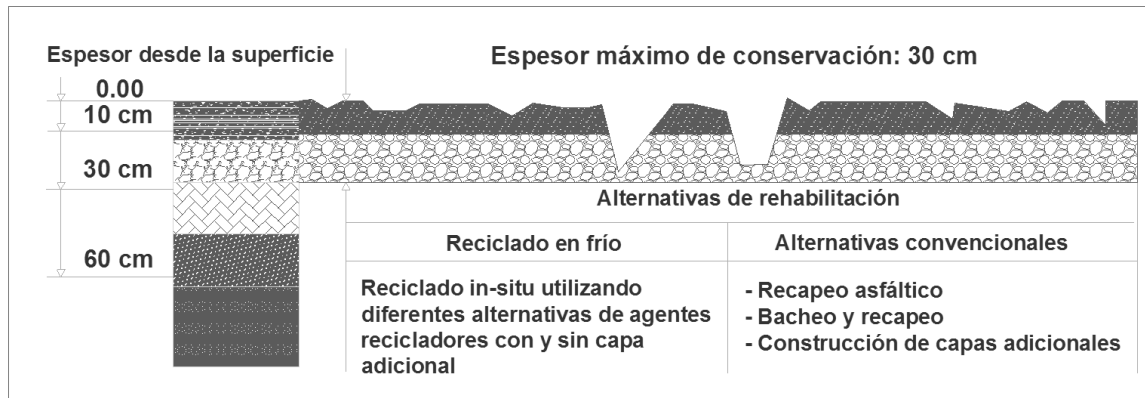
La clave para encontrar la mejor solución de rehabilitación, es la de identificar correctamente una o más opciones de rehabilitación. Éstas deben ser técnica y económicamente viables. Las figuras 12, 13 y 14 muestran una guía fácil para determinar las opciones de rehabilitación alternativas, éstas se basan en la situación actual del pavimento existente.

Figura 12. **Alternativas de conservación para falla superficial**



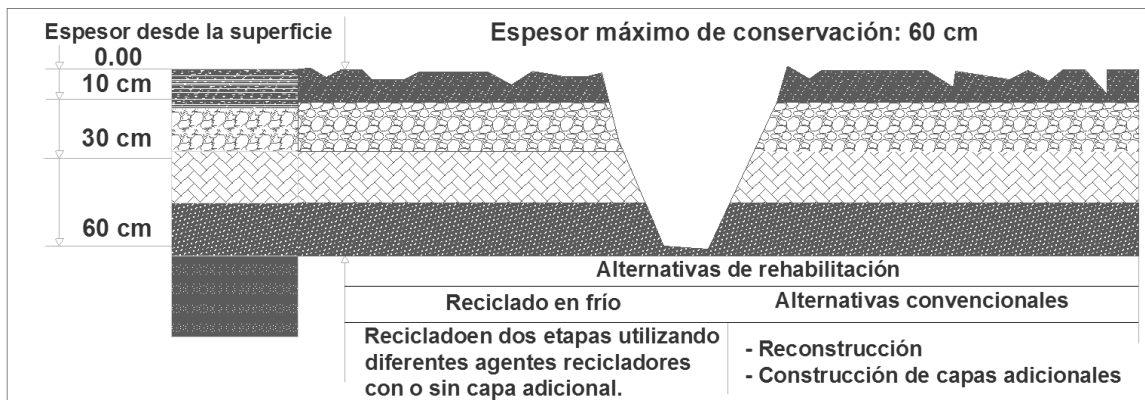
Fuente: Cold Recycling Manual, Wirtgen, 2004. p.52.

Figura 13. **Alternativas de conservación para falla estructural en capas superiores**



Fuente: Cold Recycling Manual, Wirtgen. 2004. p.52.

Figura 14. **Alternativas de conservación para falla por asentamiento de la estructura**



Fuente: Cold Recycling Manual, Wirtgen. 2004. p.52.

Es pertinente considerar que de requerirse de soluciones alternativas a las presentadas anteriormente, el reciclado en frío ofrece ser una opción viable, ya que permite mantener los niveles de cotas originales y al mismo tiempo reforzar la estructura de pavimento. Si, por otra parte, se requiere reforzar la estructura de pavimento de tal manera que es necesaria la colocación de capas adicionales, es importante tomar en cuenta las acciones correspondientes para que el cambio de altura de la estructura de pavimento, no afecten considerablemente las entradas a tuberías, tragantes u otras obras de drenaje y que las capas subyacentes no queden expuestas a filtraciones de agua.

Cuando se elige el reciclado, es importante determinar la profundidad inicial del mismo, facilitando el proceso de selección de espesores y fijar la profundidad del reciclado total. De igual forma, es importante identificar las características del material a reciclar para elegir apropiadamente el agente estabilizador que se utilizará de requerirse.

Cuando la rehabilitación del pavimento implica cambios de cualquier tipo en la estructura de pavimento, es primordial aplicar los métodos de diseño apropiados para lograr que se realice una construcción adecuada.

A continuación se mencionan brevemente algunos métodos de diseño, los cuales se considera son los más utilizados y que han sido comprobados científica y experimentalmente.

#### **4.1. Método de guías de diseño**

Los métodos de guías de diseño se basan en el análisis de los materiales existentes o requeridos en una estructura de pavimento, esto es el tipo y calidad de los mismos. Con este método se formula una lista de diversos tipos de

pavimentos para diferentes condiciones de soporte y volúmenes de tránsito. Con el listado de los diversos tipos se obtiene una gama de opciones de rehabilitación para ser aplicadas en condiciones similares. Este procedimiento es usualmente desarrollado de forma analítica, y al mismo tiempo se considera restrictivo debido a que no puede aplicarse en lugares distintos, es necesario realizar un proceso diferente cuando varían las propiedades de los materiales y las condiciones climáticas. Es de suma importancia realizar un análisis de las condiciones de soporte usadas en este método, esto en base a las opciones de diseño para las cuales se desarrollaron.<sup>23</sup>

#### **4.2. Método del número estructural**

Los métodos del número estructural se basan en la asignación de coeficientes a los materiales de las diferentes capas que formarán la estructura de pavimento de acuerdo a las características de los mismos. El número estructural (SN) resume el producto del coeficiente estructural, el espesor de la capa correspondiente y las características de drenaje del material. En base a la cantidad de Esal's, parámetros de serviciabilidad, coeficiente de variación, confiabilidad, y módulo de resiliencia (encontrado con el C.B.R. de diseño) se determina el número estructural requerido. Luego de analizar los coeficientes aportados por la estructura propuesta, se obtiene el número estructural aportado, el cual se relaciona con el requerido y se debe cumplir con la condición de que el SN requerido sea menor o igual al SN aportado, si esta condición se cumple, se concluye que la estructura de pavimento propuesta es funcional y cumple con los requerimientos del proyecto.<sup>24</sup>

---

<sup>23</sup> Cold Recycling Manual, Wirtgen, Alemania. 2004. p.54.

<sup>24</sup> American Association of State Highways and Transportation Officials. 1993. p.54.



### **4.3. Método basado en las deflexiones**

Los métodos de diseño de rehabilitación basados en las deflexiones se utilizan para analizar la respuesta de un pavimento existente bajo una o varias cargas aplicadas. Estas medidas son usadas para realizar un análisis retroactivo del módulo de resiliencia de las capas requeridas para crear un perfil de respuesta. Este valor del módulo se emplea en la selección de la estructura de rehabilitación apropiada usando análisis mecanicistas, variando los espesores de las capas usando prueba y error, es decir que la deformación de la capa sub-yacente no exceda los límites de deformación de las capas superiores.<sup>25</sup>

---

<sup>25</sup> Cold Recycling Manual, Wirtgen, Alemania. 2004. p.54.



## **5. RECICLADO EN FRÍO**

### **5.1. Generalidades**

En este capítulo se describen brevemente los procesos y se presenta un breve resumen de los equipos utilizados regularmente para realizar el reciclado en frío. Así mismo, se exponen los múltiples beneficios obtenidos al aplicarlo y los factores principales que afectan la viabilidad del reciclado en frío en un proyecto de carreteras específico.

### **5.2. El proceso de reciclado en frío**

Existen dos formas de realizar el reciclado en frío, ya sea en planta o in-situ. Ambas opciones cuentan con pros y contras, pero en general la opción más atractiva debido al ahorro económico y de tiempo, es la del reciclado in-situ ya que se realiza con una máquina recicladora móvil, ahorrando los tiempos y costos por transporte de materia prima. Sin embargo, en el reciclado en planta, se obtiene un mejor control de los materiales utilizados en el reciclaje, teniendo un mejor control de la calidad de los materiales y de las mezclas asfálticas.

La decisión sobre qué método debe aplicarse se define básicamente por el tipo de construcción. Cuando se va a reciclar la capa de concreto asfáltico de un pavimento existente, se posee cierta limitación en su uso, debido a que puede existir variabilidad de propiedades de los materiales que la componen y se requiere de evaluaciones cualitativas para el proceso de selección o pre-tratamiento.

### 5.2.1. Reciclado en planta

Esta opción se considera especialmente cuando no se tiene confianza en los materiales a utilizar en el reciclado y se requiere de análisis exhaustivos para decidir su utilización. Esta opción es viable cuando los materiales se estabilizan con asfalto espumado y se requiere de su almacenamiento para uso posterior.

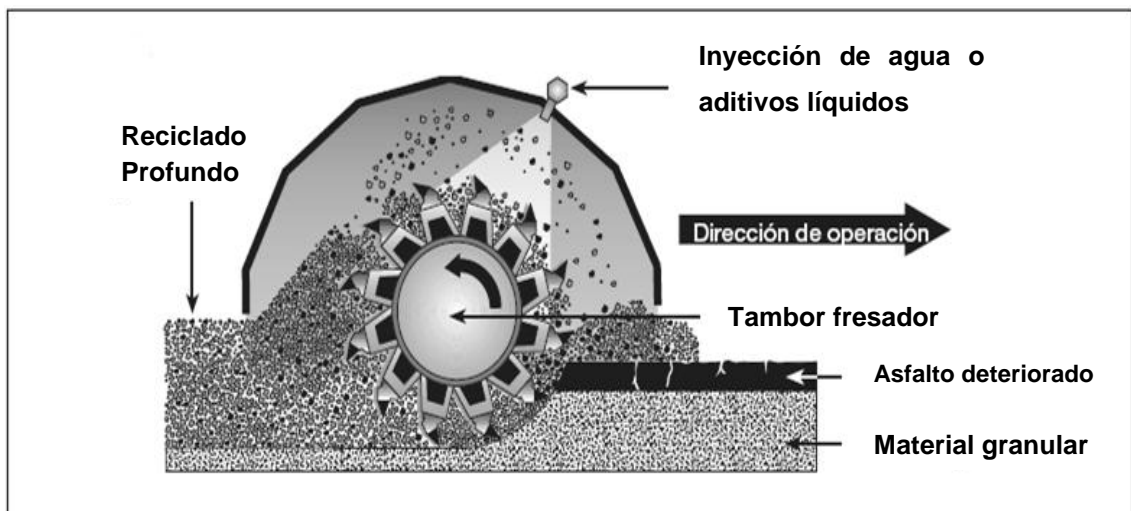
A continuación se muestran los principales beneficios del reciclado en planta versus el reciclado in-situ:

- a) Calidad de mezclado. Existe la posibilidad de realizar las modificaciones que se consideren oportunas durante la fabricación de la mezcla de agregados o aplicación de asfalto, situación que incide en la calidad de la mezcla final, o sea que se pueden mejorar las características de los agregados y el óptimo del asfalto, obteniéndose una mezcla controlada y de buena calidad.
- b) Fundado en la experiencia, se ha comprobado que llevar el control adecuado de los materiales de entrada, nos ayuda a conocer sus propiedades físicas y mecánicas. Este proceso es una de las diferencias más importantes con respecto al reciclado *in-situ*, debido a que en el reciclado en planta se tiene la facilidad de almacenar los agregados en forma correcta y analizar adecuadamente sus propiedades para realizar los cambios pertinentes en cuanto a las proporciones aplicadas y la cantidad de asfalto a utilizar. Con el reciclado *in-situ* se tiene un control limitado del material recuperado del pavimento existente.

### 5.2.2. Reciclado “in situ”

A pesar de las limitaciones que posee este proceso, con él se tiene la capacidad de reciclar capas de gran espesor en un único proceso. Esto se logra mediante la utilización de máquinas recicladoras. El elemento más importante de una máquina recicladora es el rotor fresador-mezclador, el cual está equipado con un gran número de puntas. El tambor rota y pulveriza el material del pavimento existente, como se ilustra en la figura 15.

Figura 15. **Proceso de reciclado**



Fuente: Cold Recycling Manual, Wirtgen. Alemania 2004. p.27.

Cuando la máquina recicladora avanza por el tramo a rehabilitar, el tambor de la máquina rota y el agua proveniente de un tanque acoplado a dicha máquina, se llena por medio de mangueras ubicadas dentro de la cámara de mezclado. El flujo de agua es medido con exactitud por medio de un micro procesador ubicado en el sistema de bombeo, mientras que el tambor mezcla el agua con el material reciclado para alcanzar el contenido óptimo de humedad y

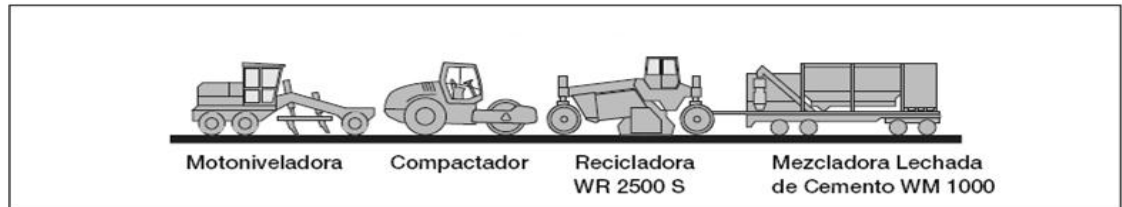
al mismo tiempo, lograr el máximo porcentaje de compactación de la capa trabajada. Mientras se realiza este proceso, se pueden introducir directamente a la cámara de mezclado los agentes estabilizadores escogidos, ya sea líquidos de lechada cemento/agua o emulsión asfáltica, de manera separada o combinada. También se puede inyectar el asfalto espumado dentro de la misma cámara por medio de una barra aspersora.

De requerirse la utilización de algún agente estabilizador como la cal, ésta normalmente se esparce en la superficie del pavimento existente, delante de la recicladora, Se hace transitar la máquina recicladora sobre ella, mezclando la cal con el material recuperado y por último se le inyecta agua para proporcionar la humedad necesaria.

Los trenes de reciclado se pueden configurar de diferente forma, según sea el tipo de reciclado que se requiera. En los distintos casos, la máquina recicladora empuja o hala el equipo conectado a ella para ejercer la fuerza necesaria sobre el tren y lograr el reciclado efectivo del pavimento. En las figuras 16 y 17, se ilustran las configuraciones típicas de trenes de reciclado.

El tren de reciclado presentado en la figura 16, se utiliza cuando el material se estabiliza con cemento. Es importante realizar una medición lo más exacta posible de la tasa de aplicación requerida de cemento y agua antes de mezclarse para formar la lechada, esta lechada se bombea a la recicladora por medio de una manguera que la inyecta en la cámara pulverizadora. Sin embargo, también existe la posibilidad de realizar el mismo procedimiento con la aplicación de la cal, que es esparcir el cemento sobre el pavimento existente delante de la recicladora, colocando en lugar del mezclador de lechada, el tanque de agua.

Figura 16. **Típico tren reciclador con mezclador de lechada**

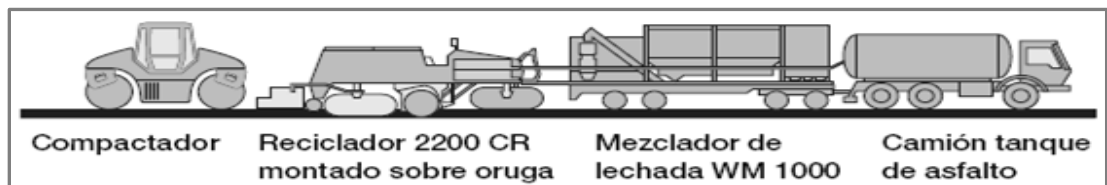


Fuente: Cold Recycling Manual, Wirtgen. Alemania 2004. p.28.

El material que sale de la recicladora, se debe compactar inicialmente con un rodillo pesado vibratorio para que la capa reciclada logre alcanzar una densidad uniforme. Posteriormente, el material se debe perfilar con una motoniveladora antes de ser compactado nuevamente, esta vez por medio de un compactador neumático y un rodillo vibratorio.

Cuando la emulsión o el asfalto espumado se aplican juntos con la lechada de cemento, la configuración del tren de reciclado debe ser de forma similar al anterior, como se ilustra en la figura 17. Si se esparce el cemento sobre la superficie del camino delante del tren de reciclado, el tanque de asfalto se debe acoplar a la recicladora y el tanque de agua se empuja, colocándose delante del tren de reciclado.

Figura 17. **Típico tren reciclador con mezclador de lechada**



Fuente: Cold Recycling Manual, Wirtgen. Alemania 2004. p.28.

### **5.3. Aplicaciones de reciclado en frío**

El reciclado en frío es un proceso muy completo, capaz de satisfacer diversas necesidades en la rehabilitación de carreteras, categorizando el proceso según el tratamiento que este reciba ya sea que se pretenda o no estabilizar el material reciclado. Es primordial que al momento de realizar la evaluación del pavimento, se consideren las opciones de construcción o rehabilitación pertinentes para optimizar los recursos disponibles y hacer aún más beneficioso el proceso del reciclado en frío.

#### **5.3.1. Reciclado del 100% de RAP (Recycled Asphalt Pavement)**

Reciclar el material 100% RAP requiere considerar diversos factores componentes de la estructura de pavimento existente, estos van desde la naturaleza y composición del pavimento existente (granulometría de la mezcla asfáltica y/o de la capa de base, tipo de mezcla asfáltica, contenido de asfalto, etc.); el tipo y causas del deterioro, si posee agrietamiento o deformación permanente, la severidad del deterioro y el objetivo de la rehabilitación.

Para el reciclado del 100% del material RAP, pueden aplicarse dos tecnologías distintas.

Una es rejuvenecer el pavimento, reciclando al menos 10 centímetros y colocando una capa de mezcla asfáltica en frío sobre el material reciclado. La segunda es la estabilización del RAP con cemento, emulsión o asfalto espumado en una capa más profunda, en más de 10 cm de espesor, llegando hasta la capa de base.



### **5.3.2. Estabilización con RAP/Base granular**

Cuando se posee una carpeta de concreto asfáltico o doble tratamiento, y la superficie está afectada por fallas con niveles de agrietamiento severo, es posible mejorar las características de la rodadura mediante la estabilización del material RAP incluyendo la capa de base, en este caso del tipo granular. Esto se logra mediante el reciclado profundo y su objetivo primordial es el de mejorar las propiedades de los materiales reciclados y reintegrar los niveles de serviciabilidad originales.

La profundidad de este reciclado y la estabilización RAP/base granular, pueden variar según las condiciones que se tengan en campo. Estas profundidades generalmente se encuentran entre 15.0 cm y 25.0 cm, pudiendo haber situaciones en las que se supere esta profundidad, como en el caso de que los niveles de tránsito superen significativamente la capacidad estructural, tomando en cuenta el espesor de capa de base existente y las propiedades de la misma.

### **5.3.3. Pulverización**

Con este proceso no es necesaria la adición de agentes estabilizadores. Éste es un método simple que consiste en pulverizar la carpeta asfáltica existente, compactarla y dejarla como soporte para la construcción de nuevas capas, haciendo la función de una base asfáltica, lo cual proporcionará un mejor soporte a las capas que se coloquen arriba de la misma. Esta técnica también resulta altamente efectiva cuando se cuenta con bases estabilizadas y la carpeta asfáltica está deteriorada. Al pulverizar estos materiales, se elimina el riesgo del reflejo de grietas en las capas que se colocarán sobre el material pulverizado.

#### **5.3.4. Reprocesamiento**

Utilizando esta técnica es posible mejorar las características de caminos de terracería o no pavimentados, sin necesidad de incorporar agentes estabilizadores. Esto se logra mediante la escarificación y posterior compactación de los materiales existentes, especialmente cuando se cuenta con una sub-rasante que cuente con buenas propiedades. Es importante mencionar que este reprocesamiento se logra en forma más eficiente con el reciclado, no es necesaria la colocación de una capa asfáltica y es posible escarificar, compactar y colocar una capa de rodadura compuesta por materiales importados o materiales nuevos disponibles en el lugar. Utilizando esta técnica es posible conseguir una capa estable homogénea con valor soporte aceptable.<sup>26</sup>

#### **5.3.5. Modificación de propiedades mecánicas**

Uno de los factores principales que inciden en el deterioro prematuro de las capas superiores del pavimento, es la deficiencia en la granulometría de las mismas. Mediante el reciclado en frío es posible corregir las deficiencias de granulometría de los materiales, es importante si se presenta este problema, identificar algún tipo de material complementario con granulometría capaz de corregirla, logrando una curva granulométrica adecuada. Es importante tomar en cuenta que con la adición de una nueva granulometría, es necesario ajustar el contenido de humedad durante el reciclado para alcanzar las condiciones de compactación establecidas.

---

<sup>26</sup> Cold Recycling Manual. Wirtgen, Alemania. 2004. p.31.

#### 5.4. Tipos de máquinas recicladoras

En Guatemala, los trabajos de rehabilitación de carreteras son constantes y es indispensable contar con la maquinaria adecuada para que la realización de los trabajos sea eficiente y se logre la optimización de tiempo, materiales y mano de obra, lo que conseguirá un ahorro significativo de recursos económicos para la empresa privada y/o el Estado.

Se sabe que a pesar de la alta demanda para la rehabilitación de carreteras en nuestro país, son pocas las empresas que cuentan con equipo especializado para realizar los trabajos del reciclado *in situ*. Existen muchas marcas reconocidas en el mundo que fabrican maquinaria para reciclaje, entre ellas Caterpillar y Wirtgen, sin embargo Caterpillar posee una construcción y venta limitada de este tipo de maquinaria por lo que únicamente se hará la descripción de algunos modelos de maquinaria recicladora marca Wirtgen. A continuación, en las figuras 18 y 19, se muestran las recicladoras WR 2000 y WR 2500, las cuales según sus especificaciones son capaces de realizar trabajos pequeños en pavimentos delgados. Cada máquina posee un campo específico de trabajo.<sup>27</sup>

---

<sup>27</sup> Cold Recycling Manual, Wirtgen, Alemania. 2004. p.32.

Figura 18. **Recicladora Wirtgen WR2000, montada sobre neumáticos**



Fuente: Cold Recycling Manual, Wirtgen. Noviembre 2004. p.32.

Figura 19. **Recicladora Wirtgen WR2500 S, montada sobre neumáticos**



Fuente: empresa Jireh. Proyecto de Rehabilitación: Coaxán-Zacualpa-Joyabaj, Quiché.

La aplicación más frecuente de estas máquinas es el reciclado de pavimentos existentes, generalmente incluyendo las capas asfálticas superiores y una porción de la capa subyacente, ya sea que esté ligada, estabilizada o no.

Además, las características y tamaño de los neumáticos con tracción en las cuatro ruedas, permiten la estabilización de todo tipo de suelos, desde suelos inertes hasta suelos blandos de alta plasticidad (arcillas). La estabilización de suelos generalmente se aplica a la sub-rasante de la estructura de pavimento cuando se trata de una construcción nueva.<sup>28</sup>

Figura 20. **Recicladora Wirtgen WR 4200**



Fuente: Cold Recycling Manual, Wirtgen. p.34.

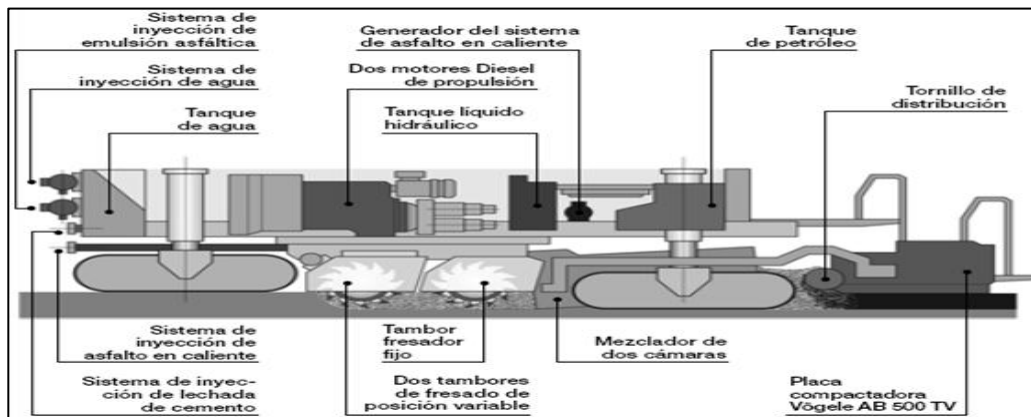
La recicladora mezcla en forma efectiva el material recuperado del ancho completo del corte. El material pulverizado por el tambor de fresado con ancho variable es levantado dentro del mezclador de doble eje donde se mezcla con agua y los agentes estabilizadores, antes de ser depositados sobre el camino como cordón y ser esparcidos por un tornillo sinfín. La configuración se muestra en la figura 21.<sup>29</sup>

---

<sup>28</sup> Cita del Cold Recycling Manual, Wirtgen, Alemania. 2004.

<sup>29</sup> Cita del Cold Recycling Manual, Wirtgen, Alemania. 2004.

Figura 21. Configuración del reciclador WR 4200



Fuente: Cold Recycling Manual, Wirtgen. 2004. p.35.

## 5.5. Beneficios del reciclado en frío

Experimentalmente se ha logrado conocer que con el reciclado en frío, existe beneficio en los factores medio ambientales, debido a que se hace uso del 100% de los materiales del pavimento existente, lo que genera un ahorro energético considerable.

Se minimizan los volúmenes de material de bancos de préstamo, lo que incide en el ahorro de combustibles fósiles, mano de obra, etc.

Reduce los efectos nocivos en el medio ambiente, ya que se reduce drásticamente el costo por transporte y acarreo de materiales.

El consumo de energía total, efecto destructivo en los vehículos y consumo de recursos hídricos se reduce en forma considerable.

## **6. AGENTES ESTABILIZADORES**

Con base en la experiencia, se puede decir que en muchos lugares del país es imposible contar con materiales adecuados para la construcción de carreteras, esto repercute directamente en los costos de transporte y acarreo de los mismos. Debido a lo anterior, se ha promovido el desarrollo de técnicas de estabilización para poder utilizar los recursos disponibles localmente, en este caso el del reciclado en frío utilizando diversos tipos de agentes estabilizadores.

### **6.1. Tipos de agentes estabilizadores**

En la actualidad se fabrican y utilizan diversidad de agentes estabilizadores, ya sea para los materiales o para su utilización en mezclas asfálticas. Poseen diferentes compuestos químicos que varían desde la resistencia de los materiales hasta la adherencia de los mismos. Algunos son más sofisticados que otros, ya que poseen compuestos como polímeros y derivados del petróleo y otros convencionales como el cemento, cal y el asfalto. Todos ellos sirven para aglomerar las partículas individuales de agregado grueso, ya que el agente estabilizador con el material fino forma una especie de mortero, esto con el fin de incrementar su valor soporte e impermeabilizar total o parcialmente el material para alcanzar una mayor resistencia al agua.

Cuando los materiales componentes de una estructura de pavimento son repetidamente cargados a niveles de tensiones que superan su resistencia última, se presentan fallas como deformaciones que se traducen en ahuellamiento. Al añadir un material estabilizador, se ligan las partículas del material, haciendo que la resistencia a las tensiones con distintos niveles de

carga, sean superiores que las recibidas y se reduzcan considerablemente o se eliminen los problemas de deformaciones en el pavimento.

## **6.2. Estabilización con asfalto**

El asfalto se conoce como un material viscoso, de color negro y capaz de ser utilizado como aglomerante e impermeabilizante. Su uso principal es para la construcción de carreteras debido a que tiene la capacidad de deformarse bajo determinadas cargas de tránsito y regresar a su estado original (sin deformación). Se posee la limitante de que requiere de la aplicación de determinadas temperaturas para que sea trabajable, ya que a temperatura ambiente es un líquido con alta viscosidad no trabajable. En general, se conocen cuatro maneras para fluidificar el asfalto y convertirlo en trabajable:

- a) Calentando el asfalto (aumentando la temperatura)
- b) Convirtiéndolo en asfalto espumado
- c) Mezclándolo con solventes derivados del petróleo (diesel, kerosene, etc.)
- d) Agregarle agua y químicos para formar una emulsión asfáltica

## **6.3. Estabilización con emulsión asfáltica**

La emulsión es una mezcla de asfalto con emulsificantes que con la adición de agua permite que se trabaje a temperaturas menores a los 100 °C, esto facilita su utilización en el campo. En Guatemala, la emulsión asfáltica más utilizada es la CSS1h, de rompimiento lento, utilizada para la producción de mezclas asfálticas en frío y la construcción de carreteras. Cuando la emulsión se utiliza como agente estabilizador, regularmente tiene un componente de asfalto residual de 60%, lo que significa que el 40% restante del volumen está compuesto de agua y agentes emulsificantes. El porcentaje de asfalto puede



variar entre 30% y 70%, pero los porcentajes de asfalto mayores a 60% no se recomiendan para el reciclado en frío debido a que la emulsión aumenta su viscosidad y se vuelve más difícil de bombear, situación que repercute en el recubrimiento del agregado.<sup>30</sup>

#### **6.4. Estabilización con asfalto espumado**

El proceso para la obtención del asfalto espumado es inyectar una porción de agua, la cual va de 1 a 2%, una porción de concreto asfáltico (de 2% a 3% en peso), aire comprimido a una masa de asfalto a temperaturas entre 160 °C a 180 °C, los cuales, dentro de una cámara de expansión, se mezclan y al producirse la fusión entre agua y el concreto asfáltico caliente, se produce la evaporación e inmediata expansión en el vapor de agua saturado, formando gran cantidad de burbujas que recubren inmediatamente el material reciclado. Debido a la expansión de vapor de agua saturado, el volumen se multiplica de 15 a 20 veces.

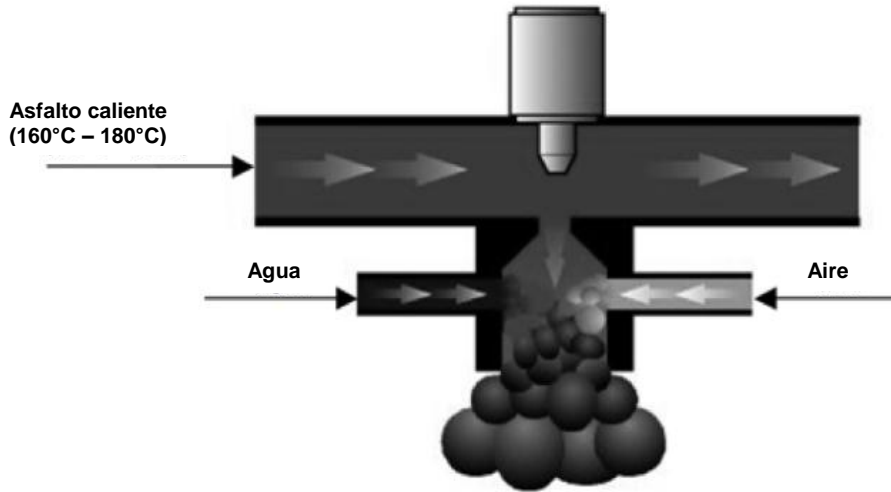
El primero en darse cuenta del potencial de usar asfalto espumado fue el profesor Ladis Csanyi en la Estación Experimental de Ingeniería, Universidad Estatal de Iowa en 1956. Luego esta tecnología fue refinada por Mobil Oil la cual desarrolló la primera cámara de expansión para mezclar agua con asfalto para generar espuma. El sistema desarrollado por Wirtgen a mediados de los años '90 inyecta aire y agua al asfalto en la cámara de expansión, como se muestra en la figura 22.<sup>31</sup>

---

<sup>30</sup> Cold Recycling Manual, Wirtgen, Alemania. 2004., [www.padegua.com](http://www.padegua.com)., [www.textoscientificos.com](http://www.textoscientificos.com).

<sup>31</sup> Cold Recycling Manual, Wirtgen. 2004. p.75.

Figura 22. Producción de asfalto espumado



Fuente: Cold Recycling Manual. Wirtgen. p.75.

## 7. ASFALTO ESPUMADO

### 7.1. Propiedades del asfalto espumado

El asfalto espumado es un agente estabilizador eficiente, ya que es posible trabajarlo con gran variedad de materiales, desde materiales granulares, triturados y materiales con cierto porcentaje de plasticidad. Las principales ventajas de estabilizar con asfalto espumado son:

- a) Reducción significativa de los costos por asfalto, debido a que sólo se necesita de un pequeño porcentaje de asfalto y de agua para su producción. No se requiere de la instalación de plantas de producción, teniendo como única inversión, el costo inicial del equipo.
- b) Es posible almacenar los materiales estabilizados con asfalto espumado durante largos períodos de tiempo, en situaciones climáticas adversas sin que se produzca un lavado del asfalto en el agregado.
- c) Se reducen significativamente los costos por transporte de materiales, ya que únicamente resulta necesario transportar el equipo de reciclado del campamento al área de trabajo.
- d) No se requiere de periodos prolongados para la apertura del tramo. El material estabilizado con asfalto espumado puede ser colocado, compactado y abierto al tránsito inmediatamente.<sup>32</sup>

---

<sup>32</sup> Cold Recycling Manual, Wirtgen, Alemania. 2004. p.76.

Resulta necesaria la utilización de cemento conjuntamente con el asfalto espumado, esto debido a que con este agente se puede mejorar la trabajabilidad y resistencia de la capa estabilizada, reduciendo al mismo tiempo la excesiva humedad que se pueda tener.<sup>33</sup> Cuando se cuenta con materiales con elevado porcentaje de plasticidad se debe utilizar cal debido a que ello ayuda a reducir la plasticidad que los materiales existentes puedan tener, la aplicación de la misma puede darse en porcentajes que van desde el 1% al 3% según el nivel al que se requiera la reducción del índice de plasticidad. Así mismo, estos agentes estabilizadores pueden modificar el porcentaje del material que pasa el tamiz No. 200 (0.075 milímetros) por lo que debe cuidarse y controlarse este aspecto para no variar considerablemente la granulometría del suelo.

A pesar de que la aplicación del asfalto espumado se descubrió en los años 50, en Guatemala y el mundo, han sido pocos los proyectos construidos aplicando esta tecnología.

El procedimiento de diseño de las mezclas se realiza de la misma forma que con el diseño tipo Marshall, incluso las probetas requieren de las mismas especificaciones para su fabricación, sin embargo, la estabilidad y la fluencia no son elementos requeridos para su ensayo siendo sustituidos por el ensayo a tracción indirecta, del cual se hablará más adelante.

---

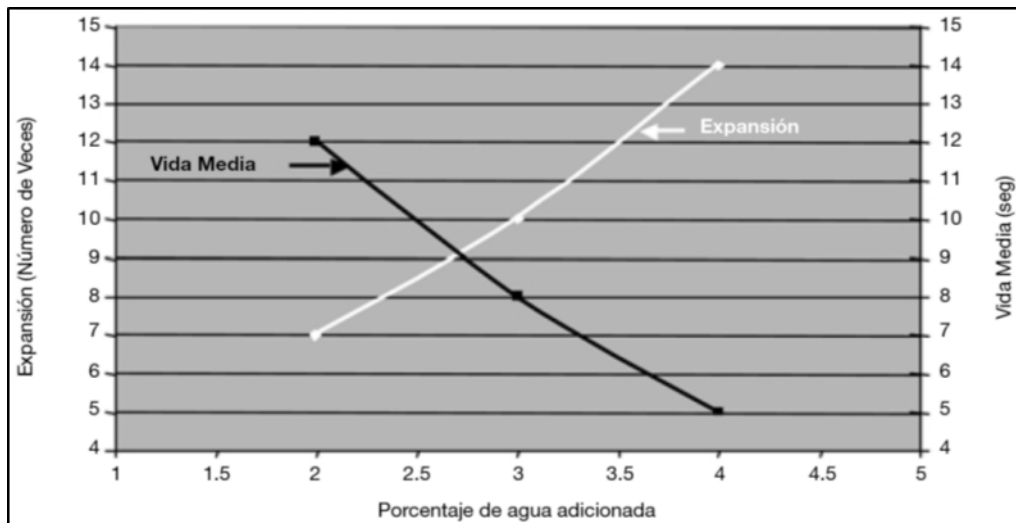
<sup>33</sup> Cold Recycling Manual. Wirtgen, Alemania. 2004.

## 7.2. Calidad del asfalto espumado

La calidad del asfalto espumado, puede deducirse por los factores “*expansión*” y “*vida media*”. “*Expansión*” se refiere a la relación entre el volumen máximo alcanzado del asfalto en estado espumado y el volumen del asfalto sin espumar. “*Vida media*” es el tiempo transcurrido en que tarda la espuma en sedimentarse hasta la mitad del volumen máximo obtenido toda vez concluido el espumado. Después de cierto tiempo, la espuma del asfalto se sedimenta. La vida media se indica en segundos y, por lo general dura entre 5 y 10 segundos.

Esto puede resumirse en que mientras la “*expansión*” y la “*vida media*” sean mayores, la calidad del asfalto espumado es mejor.<sup>34</sup>

Figura 23. Relación entre factor de expansión y vida media



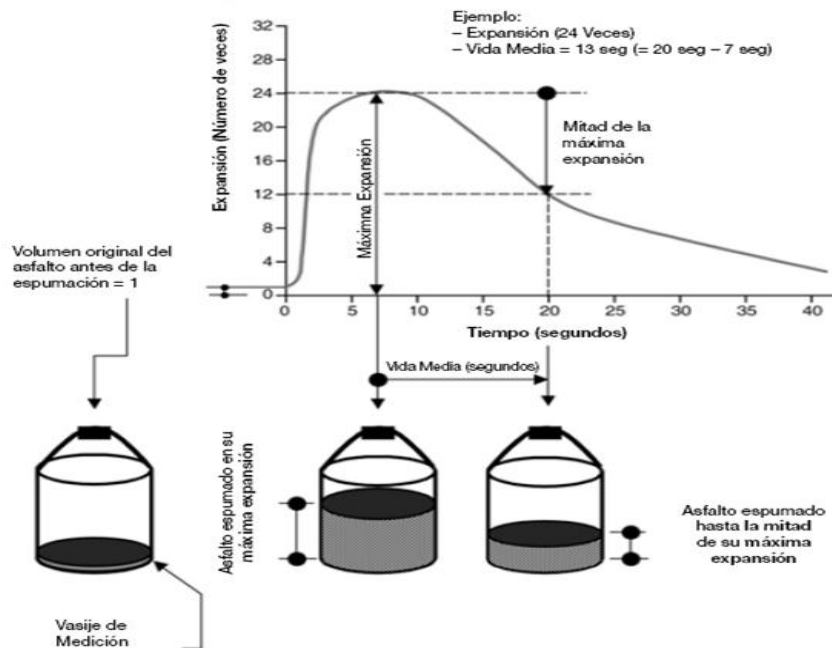
Fuente: Cold Recycling Manual, Wirtgen. 2004. p.78.

<sup>34</sup> Guía para la rehabilitación de pavimentos con asfalto espumado, Wirtgen.

Es muy importante saber que los factores “*vida media*” y “*expansión*” se desarrollan en sentido contrario, por lo que mientras mayor sea el aumento, mayor será la cantidad de agua que se requiera, esto determinará la calidad del asfalto espumado. A continuación se presenta una gráfica en la que se ilustran los factores de vida media y expansión y el comportamiento de los mismos.<sup>35</sup>

La mejor espuma es la que optimiza la “*expansión*” y la “*vida media*”. Para determinar las propiedades de un asfalto espumado y obtener la optimización del mismo, es necesario recurrir a los procedimientos especificados para la elaboración de mezclas utilizando asfalto espumado.

Figura 24. **Características del asfalto espumado**



Fuente: Cold Recycling Manual, Wirtgen. p.77.

<sup>35</sup> Cold Recycling Manual. Wirtgen, Alemania. 2004.

### **7.2.1. Factores que influyen en la propiedad de la espuma**

Como se menciona anteriormente, los factores principales influyentes en las propiedades de la espuma son la razón de expansión y la vida media del asfalto espumado, las cuales están afectadas directamente por:

La adición de agua. Diversos estudios realizados por expertos en el tema, han dado buenos resultados al realizar un aumento considerable en la cantidad de agua aplicada al asfalto espumado. Esto se puede traducir en que al aumentar la cantidad de agua, aumenta el volumen de espuma hasta por un factor multiplicador de 1500, aumentando el tamaño de las burbujas y por consiguiente el factor de “*expansión*”, sin embargo, se debe de verificar la máxima cantidad de agua a agregar debido a que si se agrega agua en exceso, puede inducir a una mala calidad del asfalto espumado. De la misma forma, al tener un tamaño de burbujas muy grandes, ocurre que la película de asfalto espumado en el agregado es más delgada, lo que puede incidir en la adhesión de los agregados. Lo anterior también puede explicarse de tal forma que la cantidad de agua añadida, está relacionada de forma inversa con la razón de expansión y vida media como se puede observar en la figura 23, en la página 71.

Tipo de asfalto. De ser posible, es importante analizar el tipo de asfalto a utilizar o poseer la información necesaria proporcionada por la empresa productora del mismo. Esto debido a que de utilizarse un asfalto rígido, puede resultar en una espuma de menor o mala calidad. Algunos valores de penetración para lograr la optimización de la espuma, pueden estar entre 80 y 150.

Temperatura de asfalto. El valor de la temperatura aplicada al asfalto incide directamente en la viscosidad del mismo, ya que ésta relación es inversa. Dicho de otra manera, si la temperatura aumenta, la viscosidad del asfalto se reducirá y mientras menor sea el valor de viscosidad, el tamaño de la burbuja aumentará de tamaño. La temperatura, antes del espumado, se considera óptima en un valor ligeramente mayor a los 160 °C, esto debe comprobarse en el laboratorio.

Presión de asfalto y de agua. Como se ha indicado anteriormente, en la cámara de expansión se produce la mezcla de asfalto y agua de una forma dispersa por la diferencia de temperaturas para lograr un recubrimiento óptimo de los agregados. La presión juega un papel importante para este propósito ayudando en la atomización y que por medio de esta se logre una mayor área de contacto.

Aditivos. La adición de aditivos al asfalto espumado depende de la calidad de espumado del asfalto, usualmente, cuando se cuenta con un asfalto difícil de espumar, es cuando es necesaria la adición de éstos. La adición de aditivos se considera como un último recurso para mejorar las propiedades espumantes del asfalto.

### **7.2.2. Características aceptables del asfalto espumado**

Para lograr la obtención de un asfalto con espumado óptimo, se debe contar con el equipo de laboratorio necesario para realizar los ensayos tanto para asfalto como para los materiales a utilizar. En el laboratorio debe buscarse la relación temperatura del asfalto versus porcentaje de agua, que produzca un espumado capaz de recubrir adecuadamente el material reciclado, esto se realiza en el laboratorio mediante un simple procedimiento y debe traducirse a



proporciones equivalentes en el campo, teniendo en cuenta las variaciones que puedan presentarse entre uno y otro lugar.

Se poseen ciertos valores mínimos para las razones de *expansión* y *vida media* para estabilizar un material a 25 °C, los cuales son:

Razón de Expansión: 10 veces

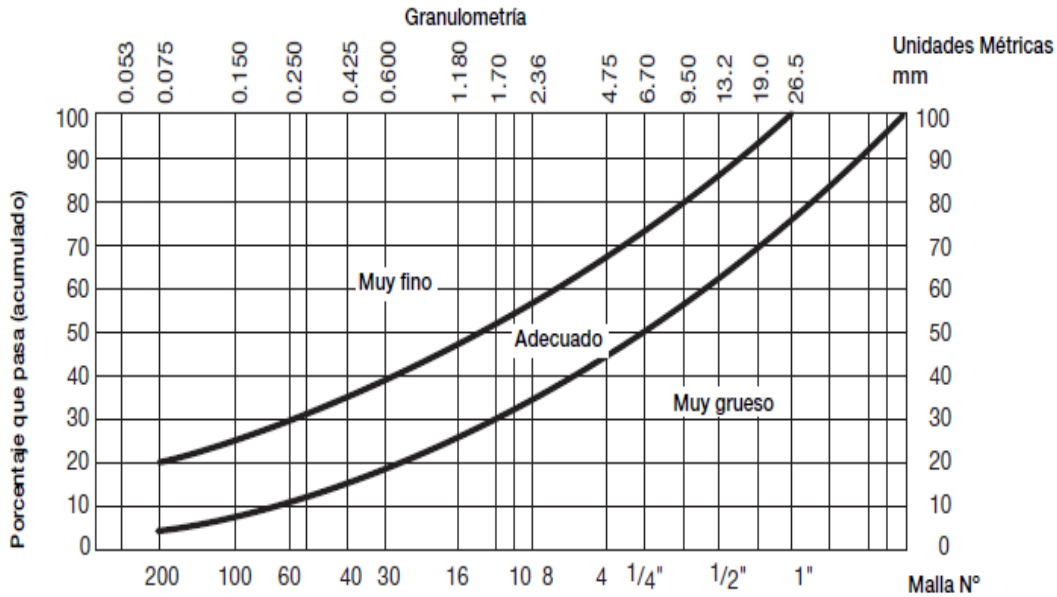
Vida Media: 8 segundos

Sin embargo, según los resultados que se han obtenido en la construcción de tramos utilizando esta técnica, se ha demostrado que contando con una razón de expansión de 8 veces y una vida media de 6 segundos, es posible obtener una dispersión adecuada de la espuma.

Contrario a las mezclas asfálticas en caliente, una mezcla con asfalto espumado toma un color café, esto debido a que el agregado no se recubre completamente y el porcentaje de asfalto aplicado se reduce con la adición de agua. Si la mezcla de agregados no posee una cantidad suficiente de finos (menos del 5% pasa tamiz No. 200), en ocasiones resulta necesaria la adición de cemento o cal, lo que ayudará a la adecuada dispersión del asfalto en este caso.

En la figura 25 se muestran los límites propuestos para la mezcla de materiales con asfalto espumado. Como se puede observar, el porcentaje mínimo requerido de finos es del 5%; si se posee un porcentaje menor, se puede producir una disminución considerable en la resistencia de la mezcla.

Figura 25. **Características de granulometría para tratamiento con asfalto espumado**



Fuente: Cold Reciclyng Manual, Wirtgen. Alemania. 2004. p.80.

Los ensayos granulométricos que se efectúen a las muestras recuperadas del pavimento existente indicarán si existe una deficiencia en el contenido de finos. De tener poca cantidad de finos, es necesario agregar un material importado con la cantidad adecuada de finos (según los requerimientos del material). Este material se esparce sobre la superficie del pavimento antes de la aplicación del reciclado. Es importante verificar al mismo tiempo si el material existente o el importado poseen un valor aceptable de plasticidad, de no ser así, al momento de esparcir el material importado en la superficie de la rodadura, puede adicionarse en forma conjunta determinado porcentaje de cal o cemento, en porcentaje no mayor al 2% de cemento debido a que puede producir rigidez excesiva en la capa reciclada.

Es importante que la mezcla de asfalto espumado producida, contenga el mínimo porcentaje de vacíos, esto mejorará significativamente las propiedades del asfalto espumado. Así mismo, se puede hacer uso de una ecuación que relaciona la cantidad de finos y el porcentaje de vacíos, la cual se presenta a continuación. Para obtener el mínimo de vacíos, es necesario utilizar un valor  $n=0.45$ .

$$P = \frac{(100 - F)(d^n - 0.075^n)}{(D^n - 0.075^n)} + F$$

Donde:

$d$  = tamaño seleccionado del tamiz

$P$  = porcentaje en peso del material que pasa el tamiz de tamaño  $d$  (mm)

$D$  = tamaño máximo del agregado (mm)

$F$  = porcentaje del contenido de finos (inertes y activos)

$n$  = variable que depende de las características del agregado <sup>36</sup>

### **7.3. Empleo del asfalto espumado como ligante para la mezcla en frío**

#### **7.3.1. Campos de aplicación**

En los capítulos anteriores, se ha hecho especial énfasis en la utilización del asfalto espumado como ligante para mezclas de materiales, materiales reciclados y combinaciones de materiales reciclados e importados. La amplitud de posibilidades en su uso, hacen del asfalto espumado una buena opción en diversidad de proyectos, como la utilización del mismo en asfalto fresado, material escarificado, mezclas de materiales para construcciones nuevas o rehabilitaciones, así como la posibilidad de su uso en caminos de terracería, a

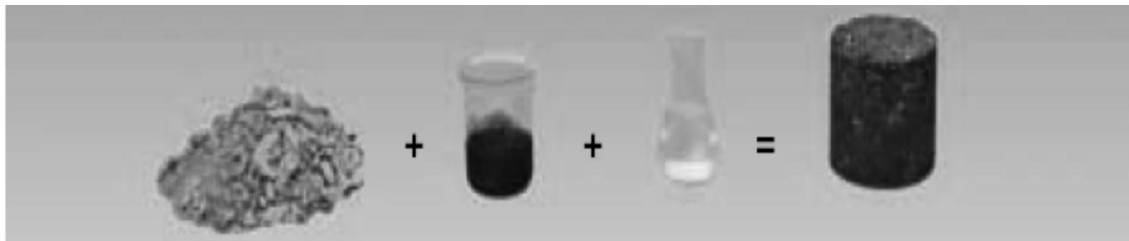
---

<sup>36</sup> Cold Recycling Manual, Wirtgen, Alemania. 2004. P. 82.

las cuales únicamente se pretende colocar capa de balasto. Cuando se tiene un camino el cual se quiere habilitar con balasto, el asfalto espumado sirve como ligante e impermeabilizante para proporcionar una rodadura más uniforme y que se mantenga en buenas condiciones en cualquier clima; en tiempo seco evitar el desprendimiento de polvo y en tiempos de lluvia enlodamientos que afecten el tránsito eficaz de los vehículos.

A continuación, en la figura 26, se muestra que al mezclar material de una capa de base granular o triturada, más la adición de asfalto espumado y agua, podemos obtener una capa de rodadura y/o base de alta calidad.

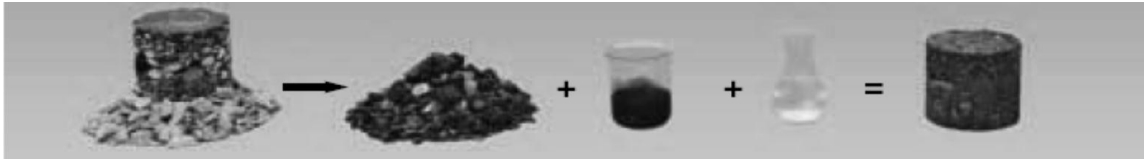
Figura 26. **Materiales para la producción de capa de rodadura y de base ligadas de forma bituminosa**



Fuente: Manual de asfalto espumado. Wirtgen. p.12.

En la figura 27, se muestra el procedimiento a partir de la mezcla de base granular o triturada más la adición de la carpeta de asfalto reciclada, más asfalto espumado y agua, con lo que se obtiene una capa de base de características similares a una carpeta asfáltica.

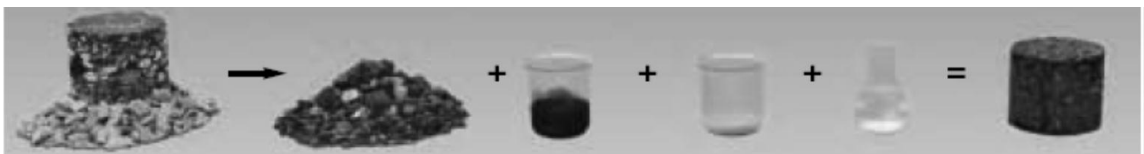
Figura 27. **Materiales utilizados en el reciclaje de materiales existentes**



Fuente: Manual de asfalto espumado. Wirtgen. p.12.

En la figura 28, la mezcla de materiales varía en que en este procedimiento se puede agregar una parte de cemento, lo cual ayuda a aumentar la capacidad portante y reducir plasticidad de existir en los materiales.

Figura 28. **Materiales utilizados en el reciclaje de materiales existentes, empleando asfalto espumado y cemento**



Fuente: Manual de asfalto espumado. Wirtgen. p.13.

### 7.3.2. **Idoneidad de la mezcla de agregados empleada**

Como en toda mezcla de materiales, un factor importante es la verificación del contenido de finos en la mezcla. En el caso de la utilización de asfalto espumado, esta característica no es la excepción, por lo que es necesario hacer esta verificación y de no contarse con el porcentaje de material fino requerido, es necesaria la adición de algún agregado que posea la cantidad necesaria de finos, lo mismo ocurre cuando no se cuenta con la cantidad suficiente de agregado grueso.

### 7.3.3. Propiedades de la mezcla en frío

El ensayo requerido para determinar la idoneidad de una mezcla en frío con asfalto espumado, es el ensayo de resistencia a la tracción indirecta (ITS) en probetas fabricadas por el método Marshall. Los valores arrojados por este ensayo son de resistencia, los cuales regularmente se encuentran dentro de los siguientes parámetros:

- a) RAP/material triturado, en proporciones iguales:  
350 – 800 kilo Pascales (50.8 – 116.0 psi).
- b) Roca triturada: 400 – 900 kilo Pascales (58.0 – 130.5 psi).
- c) Grava natural: 250 – 500 kilo Pascales (36.0 – 72.5 psi).<sup>37</sup>

Parámetros establecidos para contenidos aproximados de 1.5 a 4.5% de asfalto espumado y 1 a 1.5% de cemento.

---

<sup>37</sup> Valores propuestos por el Manual de Asfalto Espumado, Wirtgen GmbH. Alemania.

## **8. DISEÑO DE MEZCLAS DE AGREGADOS CON ASFALTO ESPUMADO**

### **8.1. Características**

Con base en la experiencia, se puede establecer que tanto para proyectos nuevos o rehabilitados con asfalto espumado, es necesario realizar un control adecuado de las muestras a estabilizar, ya que de no realizarse se corre el riesgo de obtener resultados erróneos, que afectarán directamente la realización del proyecto. Debido a lo anterior, se deben tomar en cuenta varios factores de suma importancia para la toma de muestras:

- a) Tener información confiable de los espesores de capas existentes y definir la profundidad a reciclar y las proporciones de cada capa existente que se necesitarán para mezclar y conformar la capa compuesta con asfalto espumado.
- b) Obtener detalles de la variabilidad del material (de existir la misma) en la longitud y espesores de la estructura de pavimento existente. Esto significa que deben de existir variaciones importantes, deben realizarse los diseños de mezclas necesarios para considerar este aspecto.
- c) Realizar la preparación adecuada del material del pavimento existente que servirá para la mezcla (previo análisis de esta capa).

## 8.2. Equipo de laboratorio

Tanto para el análisis de suelos como el de materiales para diseñar una mezcla de asfalto espumado, óptima para su utilización en el proyecto, se requiere de equipo de laboratorio disponible en el campo, esto para verificar las propiedades de la mezcla al inicio, durante y después de su producción. A continuación se menciona brevemente el equipo para ello.

- a) Planta portátil de laboratorio, debe ser capaz de producir asfalto espumado a razón de 50 a 200 gramos por segundo. La planta debe poseer un recipiente controlado termostáticamente, capaz de contener una masa de diez kilogramos de asfalto a una temperatura entre 150°C y 205 °C, con un margen de  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ . Debe poseer también un dispositivo para el suministro de aire comprimido de baja presión de 0 a 500 kilo Pascales, con una precisión de  $\pm 25$  kilo Pascales.
- b) Moldes de compactación Marshall con placa de base y collar de extensión.
- c) Prensa con capacidad mínima de carga de 20 kilo Newton con velocidad uniforme de desplazamiento de 50.8 milímetros por minuto, provista de un medidor de carga de cuando menos 15 kilo Newton con una precisión de 0.1 kilo Newton.
- d) Balanza de 5 kilogramos de capacidad, con precisión de 1 gramo.
- e) Termómetro con un rango de 0 a 50°C.



- f) Demás equipo requerido para análisis de mezclas por el método Marshall y para el análisis de suelos y agregados.<sup>38</sup>

### **8.3. Optimización de las propiedades**

El objetivo principal es maximizar la relación de “*expansión*” y “*vida media*” del asfalto espumado, esto se logra mediante la obtención del porcentaje de agua óptimo a aplicar en la mezcla con determinado asfalto. Esto se explica en la séptima parte, sección 7.2.

El procedimiento para realizar esta medición, consiste en descargar espuma durante 5 segundos, en un tambor de acero de 20 litros. Al terminar este procedimiento, es necesario señalar con un marcador el nivel del volumen máximo alcanzado por la espuma, también se debe medir el tiempo que tarda la espuma en reducir su volumen a la mitad (*vida media*). Posteriormente, se realiza el cálculo de la expansión del asfalto espumado dividiendo el volumen máximo de la espuma dentro del volumen de asfalto en el tambor luego de que la espuma se disipe totalmente, nunca antes de 60 segundos.

### **8.4. Preparación de agregados pétreos**

Es necesario contar con agregados de calidad para la producción de asfalto espumado, ya que en ello variará la misma. Para lograr la identificación de los agregados pétreos óptimos para ser utilizados, es necesario seguir determinados pasos. Algunos de ellos se detallan a continuación:

---

<sup>38</sup> Norma internacional I.N.V. E-785-07. Diseño de mezclas con agregados con cemento asfáltico espumado.

- a) Determinar la granulometría y la plasticidad de los agregados.
- b) Se realiza el ensayo de Próctor, para obtener el contenido óptimo de humedad y densidad máxima del agregado.
- c) Secar la muestra de agregado a temperatura constante a 105 °C. Si se tratase de materiales recuperados de un pavimento existente, el secado requiere de menor temperatura, esto para evitar que las partículas se adhieran unas con otras. Debe determinarse el contenido de asfalto de la carpeta de rodadura recuperada.<sup>39</sup>

## **8.5. Tratamiento de agregados con asfalto espumado**

Al igual que en el diseño tipo Marshall, para el diseño de mezcla con asfalto espumado, idealmente deben prepararse cinco briquetas de 10 kilogramos de mezcla de agregados cada una, conteniendo porcentajes de asfalto variables a razón de 1% de crecimiento para cada una. Debe calibrarse adecuadamente el equipo de laboratorio para realizar los ensayos correspondientes. Cada briketa debe tener una altura estándar de 64 mm y diámetro de 102 mm.<sup>40</sup>

Cada briketa debe prepararse de acuerdo con el siguiente procedimiento:

---

<sup>39</sup> Norma internacional I.N.V. E-785-07. Diseño de mezclas con agregados con cemento asfáltico espumado.

<sup>40</sup> Norma internacional I.N.V. E-785-07.

En el recipiente adecuado, se coloca la cantidad de material completa. Se añade la cantidad de agua determinada mediante el ensayo de Próctor añadiendo al mismo tiempo la cantidad de asfalto requerida. El tipo de mezclador a utilizar, preferiblemente debe ser mecánico y su colocación debe permitir la correcta descarga de la espuma al recipiente de mezcla. Los agregados y la combinación de agua y asfalto se mezclan durante 60 segundos. Sin detener el mezclador, se realiza la descarga de la masa requerida de asfalto espumado en el recipiente de mezcla y se continúa con el proceso de mezclado durante 30 segundos. Luego de esto, se traslada el agregado tratado con el asfalto espumado a un recipiente sellado. El procedimiento indicado debe repetirse hasta obtener el número de muestras requeridas (regularmente 5 briquetas), tratadas con diferentes porcentajes de contenido de asfalto.<sup>41</sup>

#### **8.6. Contenido de humedad y asfalto**

El contenido de humedad y asfalto están directamente relacionados debido a que con la mezcla de agua y asfalto en las proporciones determinadas, representarán la calidad de la espuma en el asfalto espumado y por consiguiente la optimización en la utilización de la mezcla.

Para determinar el contenido de humedad y asfalto que posee una mezcla con asfalto espumado ya producida, se seca cada muestra a una temperatura entre 105 °C – 110 °C, esto para determinar su humedad y luego se realiza una extracción para determinar el contenido de asfalto. Este control debe realizarse a una muestra representativa de cada bachada producida.<sup>42</sup>

---

<sup>41</sup> Norma internacional I.N.V. E-785-07. Diseño de mezclas con agregados con cemento asfáltico espumado.

<sup>42</sup> Norma internacional I.N.V. E-785-07.

Si la mezcla posee los contenidos de humedad y asfalto definidos, se avala su utilización, de lo contrario es necesario realizar las correcciones que se requieran para suprimir las deficiencias presentadas.

### **8.7. Compactación de las muestras**

La compactación de las muestras se realiza de la misma forma que para las muestras de mezcla asfáltica en frío y en caliente. Es importante que el esfuerzo de compactación utilizado en el laboratorio simule el diseño del tránsito esperado para el pavimento en el tramo.

Para la compactación de las muestras, se pueden utilizar parámetros de tránsito que servirán para determinar el número de golpes por cara a aplicar. Por ejemplo, para condiciones de tránsito ligero se pueden aplicar 35 golpes por cara, para tránsito medio, 50 y para tránsito pesado, 75 golpes. Sin embargo, en Guatemala, debido a la circulación de tránsito pesado por la mayoría de calles y rutas del país, se toma como estándar la aplicación de 75 golpes por cara.

### **8.8. Curado**

Al término del proceso de compactación, se quita el molde de la placa de base y se mantiene la muestra dentro del molde a temperatura ambiente durante 24 horas para su curado. Luego, se realiza la extracción de la muestra del molde mediante un gato hidráulico o herramienta similar.<sup>43</sup>

---

<sup>43</sup> Norma internacional I.N.V. E-785-07. Diseño de mezclas con agregados con cemento asfáltico espumado.

### **8.9. Determinación del peso específico aparente**

Terminado el proceso anterior, es posible determinar el peso específico aparente de cada briqueta, excluyendo para su uso posterior, las briquetas que arrojen resultados con variación de más de  $30 \text{ kg/m}^3$  del peso específico promedio con respecto al resto de briquetas de la misma producción.

### **8.10. Determinación de la Resistencia a la Tracción Indirecta (ITS)**

El ensayo de resistencia a la tracción indirecta es un ensayo similar al ensayo Marshall, teniendo como parámetro más común, el ser un método simple y representativo ya que permite imitar efectivamente la respuesta de un pavimento flexible a cargas aplicadas en el laboratorio respecto a las que tendrá en el tramo y obtener la carga máxima que aguanta una mezcla antes de romper.

Este ensayo consiste en someter a compresión diametral una briqueta cilíndrica, con las mismas medidas que las definidas en el ensayo Marshall, aplicando una carga de manera uniforme a lo largo de dos líneas o generatrices opuestas hasta alcanzar la ruptura de la mezcla. Este ensayo también se puede usar para ensayar probetas de mezclas con asfalto espumado compactadas y curadas bajo condiciones seca y húmeda. Esta resistencia se determina midiendo la carga última de falla de una briqueta sometida a una carga de deformación constante de  $50.8 \text{ mm/minuto}$  sobre su eje diametral, donde la falla se debe provocar en el eje axial de la probeta.<sup>44</sup>

---

<sup>44</sup> Norma internacional I.N.V. E-785-07. Diseño de mezclas con agregados con cemento asfáltico espumado.

### **8.11. Determinación del contenido de asfalto de diseño**

Esto debe realizarse para todas las muestras, tanto las ensayadas en seco como las saturadas. Al haber ensayado las muestras para determinar la resistencia a la tracción indirecta, se ordenan los valores con los porcentajes de asfalto de cada una. Se grafican los valores, colocando los valores de ITS en el eje de las ordenadas y los valores de contenido de asfalto en el de las abscisas, esto ayudará a determinar el porcentaje óptimo de contenido de asfalto en la mezcla con asfalto espumado.

Se determina si la máxima resistencia alcanzada es similar en las briquetas ensayadas en seco y saturadas para el mismo contenido de bitumen, si esto se cumple la mezcla es apta para su utilización, si no, se deben hacer las correcciones al diseño original o realizar un nuevo diseño de mezcla.

## **9. PROCEDIMIENTO DE CONSTRUCCIÓN CON ASFALTO ESPUMADO**

### **9.1. Equipo**

El equipo requerido para la rehabilitación de carreteras adicionando asfalto espumado durante el proceso de reciclado del material existente, debe poseer las características técnicas mínimas para este propósito. Como se mencionó en la quinta parte, sección 5.4 de esta tesis, existe diversidad en el tipo de maquinaria para la utilización del asfalto espumado en materiales reciclados en campo. Esta maquinaria, independientemente de la marca que se posea, debe tener las características necesarias para lograr resultados óptimos en la construcción.

### **9.2. Proceso constructivo**

#### **9.2.1. Estabilización**

Es necesario realizar el diseño de mezcla para determinar los porcentajes de aplicación de asfalto espumado, cal o cemento requeridos y luego definir los parámetros de resistencia después de la estabilización. Estos valores se utilizan para verificar los coeficientes estructurales de cada capa, los cuales se han asumido inicialmente. Esto último se aplica en caso de que sea necesario afinar algunos valores y recalcular un nuevo Número Estructural para el pavimento. Una vez que se completó la base reciclada, es posible aplicar la carpeta de rodadura asfáltica sin necesidad de imprimir la base estabilizada con asfalto

espumado. Esto permite el tránsito sin inconvenientes en la mitad del camino mientras se trabaja la otra parte, lo que fluidifica la circulación de los vehículos y reduce costos en cuanto a equipo de señalización para desvíos.

Siguiendo con el control de calidad del asfalto espumado empleado en el proceso de estabilización, en cada tramo trabajado se debe realizar la medición del contenido de asfalto residual presente en el tanque al finalizar cada jornada de trabajo, calculando con él, el consumo real de asfalto.

### **9.2.2. Compactación y terminación**

Finalizada la colocación de la capa estabilizada, ésta debe ser compactada por medio de rodillo neumático y rodillo liso vibratorio. Posteriormente, para la compactación de la carpeta asfáltica, según lo requerido por el libro de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes, Ed. 2001 de la D.G.C., se debe suministrar por lo menos 3 compactadoras, consistentes en un rodillo metálico liso, estático o vibratorio para la compactación inicial; un rodillo neumático para la compactación intermedia y un rodillo metálico liso sin vibración para las operaciones finales de texturizado de la superficie.<sup>45</sup>

Es primordial y necesario realizar chequeos de densidad en el tramo compactado. Debe compararse con la densidad obtenida en laboratorio para el mismo material y determinar el porcentaje de compactación efectivo.

---

<sup>45</sup> Especificaciones Generales para la construcción de Carreteras y Puentes, Ed. 2001, D.G.C. Sección 401, sub-sección 401.15. Compactación.



El porcentaje de compactación requerido para la capa de base estabilizada con asfalto espumado puede variar según los requerimientos del camino y las especificaciones dadas por las autoridades correspondientes. Regularmente se solicita que la capa de base estabilizada con asfalto espumado tenga un porcentaje mínimo de compactación de 98% (luego de realizada la compactación secundaria) de la D.M.C.S (Densidad Máxima Compactada Seca). Para la terminación de la capa reciclada se debe saturar la superficie con agua y luego compactar con rodillo neumático.

Si se excede en la aplicación de agua, la capa podría sufrir deformaciones que requerirán de trabajos extras que podrían resultar onerosos. Por el contrario, si la cantidad de agua resulta escasa, no se podrá realizar una buena compactación.

### **9.2.3. Limitaciones meteorológicas**

Como para todos los agentes asfálticos, el asfalto espumado no es la excepción, cuenta con limitaciones meteorológicas para su aplicación en la rehabilitación de una carretera. Esto específicamente se refiere a las consideraciones de clima que pudieran existir antes o al momento de realizar los trabajos de construcción o rehabilitación.

Como en todo proyecto vial, existe la limitación de realizar trabajos si existen o se avecinan condiciones de lluvia, niebla o algún otro fenómeno climatológico que pueda afectar la continuidad del trabajo y el buen desempeño de las actividades, los trabajos con asfalto espumado poseen la restricción

adicional que, de preferencia, no se debe trabajar si la temperatura ambiente en el lugar, es menor a los 5 °C.<sup>46</sup>

#### **9.2.4. Control de la obra**

En cada jornada de trabajo debe tomarse de la máquina recicladora, una muestra representativa del material reciclado suficiente para fabricar las seis probetas requeridas para ensayo. De ellas, tres deben ensayarse a tracción indirecta seca y tres saturadas.

Debe tenerse el control de cada aspecto de la obra, como un control de calidad adicional, deben ensayarse muestras en el laboratorio del supervisor y del contratista para corroborar los resultados y asegurar la calidad de la obra.

#### **9.2.5. Condiciones de seguridad**

Debido a que se trabaja con maquinaria pesada, y el asfalto requerido para producir el asfalto espumado debe tener una temperatura cercana a los 160 °C (para tener una espuma de buena calidad), se recomienda tomar las precauciones del caso, debido a que con el asfalto a dicha temperatura se pueden producir daños considerables en las personas, incluso la muerte.

---

<sup>46</sup> Cold Recycling Manual, Wirtgen, Alemania. 2004.

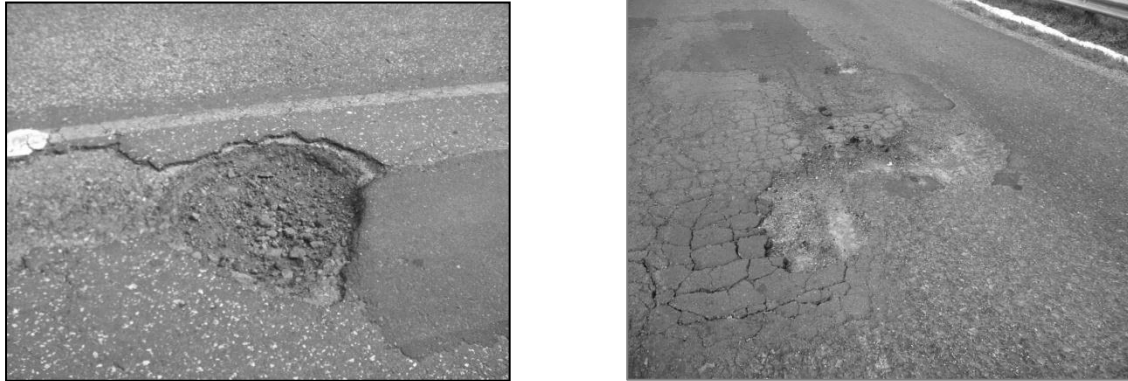
## **10. EJEMPLO DE PROYECTO DE RECICLADO DE PAVIMENTOS USANDO ASFALTO ESPUMADO**

A continuación se presenta la metodología utilizada en la evaluación y diseño para la rehabilitación de una ruta existente, utilizando asfalto espumado. La ruta evaluada y posteriormente rehabilitada corresponde al Proyecto M-72-2009, tramo “GODÍNEZ, estación 135+000 a estación 144+000 (Agua Escondida), RN-11 SAN LUCAS TOLIMÁN”.

El proyecto mencionado presentaba en su estructura una cantidad considerable de fallas en la carpeta de rodadura, de las cuales las más comunes y numerosas correspondían a grietas en bloque y grietas tipo cuero de lagarto; así mismo, se pudo observar gran cantidad de zonas con recapeo, las cuales, en algunos casos presentaban por reflexión las mismas fallas que la carpeta de rodadura original, determinando de esta manera que el pavimento presentaba una importante deficiencia estructural debido a que los espesores originales ya no cubrían los requerimientos del tramo.

A continuación se presentan diversas panorámicas del proyecto en donde se puede apreciar lo expuesto anteriormente.

Figura 29. **Baches con exposición de capa de base**



Fuente: empresa Concal. VARC. Proyecto M-72-2009.

Figura 30. **Bacheos realizados en la ruta**



Fuente: empresa Concal. VARC. Proyecto M-72-2009.

La metodología utilizada en la evaluación del tramo es la propuesta por AASHTO '93, definiendo el Número Estructural Requerido para el tramo.

Los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio para conocer las propiedades mecánicas de los suelos existentes recuperados de la estructura de pavimento. A continuación se muestran tablas con las propiedades mecánicas de los materiales de sub rasante, sub base y base.

Tabla V. **Tabla resumen de sub rasante**

Estación	% Pasa Malla No.4	% Pasa Malla No.40	% Pasa Malla No.200	Límite Líquido %	Índice Plástico %	Densidad Máxima Lbs./pie <sup>3</sup>	Humedad Óptima	C.B.R al 95 %	% Hinchamiento	Clasificación AASHTO
135+600	99,6	68,5	29,4	N. L.	N. P.	111,8	18,1	<b>46,0</b>	0,0	A - 2 - 4 ( 0 )
137+600	98,1	89,9	71,4	32,7	4,6	94,6	27,6	<b>18,0</b>	0,4	A - 4 ( 3 )
139+600	98,3	77,2	49,5	31,6	3,5	81,0	25,4	<b>27,0</b>	0,3	A - 4 ( 0 )
141+600	99,0	74,3	33,2	N. L.	N. P.	101,1	21,1	<b>64,0</b>	0,0	A - 2 - 4 ( 0 )
144+000	97,1	47,7	19,9	48,3	7,0	86,4	26,0	<b>25,4</b>	0,2	A - 2 - 4 ( 0 )

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Tabla resumen de capa de sub-base**

Estación	% Pasa Malla No.4	% Pasa Malla No.40	% Pasa Malla No.200	Límite Líquido	Índice Plástico	Densidad Máxima Lbs./pie <sup>3</sup>	Humedad Óptima	C.B.R al 95 %	% Hincha	% Equivalente de Arena	Clasificación AASHTO
141+600	69,8	38,1	14,8	N.L.	N.P.	106,7	11,2	<b>67,5</b>	0,0	27,6	A - 2 - 4 ( 0 )
144+000	69,6	38,4	15,2	N.L.	N.P.	106,5	11,0	<b>67,1</b>	0,0	27,4	A - 2 - 4 ( 0 )

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Tabla resumen de capa de base**

Estación	% Pasa Malla No.4	% Pasa Malla No.40	% Pasa Malla No.200	Límite Líquido %	Índice Plástico %	Densidad Máxima Lbs./pie <sup>3</sup>	Humedad Óptima	C.B.R al 95 %	% Hincha	% Equivalente de Arena	Clasificación AASHTO
140+000	49,1	20,0	10,4	26,2	3,1	120,0	12,1	<b>96,0</b>	0,0	25,0	A - 1 - a ( 0 )
142+000	49,2	20,3	10,6	26,1	3,0	119,9	12,3	<b>98,0</b>	0,0	24,8	A - 1 - a ( 0 )

Fuente: elaboración propia.

En cada pozo a cielo abierto realizado se tomó espesor de cada capa, encontrándose que en algunos puntos no existía capa de sub-base. Los datos de espesores obtenidos se muestran a continuación.

Tabla VIII. **Espesores de capas existentes**

Estación	Espesor (m)	
	Base	Sub-Base
144+000	0.25	0.00
141+600	0.30	0.00
139+600	0.40	0.00
137+600	0.10	0.16
135+600	0.10	0.30
<b>Promedio</b>	<b>0.23</b>	<b>0.09</b>
	<b>23 cm</b>	<b>9 cm</b>

Fuente: elaboración propia.

Se obtuvo el promedio aritmético para obtener el espesor de las capas de Base y Sub-Base para utilizar los datos en la evaluación del pavimento existente y la obtención del número estructural aportado y los números estructurales aportados a los diferentes períodos de tiempo de diseño.

Con base en los resultados obtenidos del ensayo de C.B.R. (*California Bearing Ratio*) de la sub rasante se utilizó la metodología del 85 percentil para determinar el C.B.R. (*California Bearing Ratio*) de diseño, obteniéndose el siguiente resultado:

$$C.B.R._{DISEÑO} = 21.8\%$$

Y un módulo de resiliencia de:

$$\text{Módulo de Resiliencia} = 16,350 \text{ lb/plg}^2$$

Obtenido por medio de la ecuación:  $MR = B \times C.B.R.$  Donde  $B = 750$ .

Los datos de conteo vehicular del proyecto y la cantidad de Ejes equivalente por períodos de 10 y 15 años respectivamente, se obtuvieron y calcularon en base a información proporcionada por el Departamento de Ingeniería de Tránsito de la Dirección General de Caminos. Los Esal's se proyectaron con 4% de crecimiento, los cuales dieron como resultado:

Tabla IX. **Conteos vehiculares del proyecto**

<b>Tipo de vehículo</b>	<b>Cantidad (24 hrs.)</b>
<b>Automóviles</b>	1312
<b>Pick-up</b>	200
<b>Camiones tipo C-2</b>	125
<b>Camiones tipo C-3</b>	29
<b>Microbuses</b>	0
<b>Buses</b>	120
<b>Vehículos de 4 o más ejes</b>	1

Fuente: elaboración propia.

El número de ejes simples de carga equivalentes a 18,000 libras se afectó por un factor de carril igual a 1 y un factor de dirección de 0.5.

ESAL (Para un período de diseño de 10 años): 1, 487, 934

ESAL de diseño con factor de carril de 1.0 y de dirección 0.5

ESAL (Para un período de diseño de 10 años): 1, 487, 934

ESAL de diseño con factor de carril de 1.0 y de dirección 0.5

Para definir la necesidad estructural del tramo de nuestro interés se utilizarán los resultados del Valor Soporte de las distintas capas que componen la estructura de pavimento así como de la Sub-Rasante, valores obtenidos de los ensayos de laboratorio realizados a los materiales muestreados, la cantidad de Ejes Equivalentes por períodos de 10 y 15 años, respectivamente calculados en base a los conteos vehiculares proporcionados por el Departamento de Ingeniería de Tránsito de la Dirección General de Caminos, y proyectados con un 4.0% de crecimiento; para la estructura de pavimento una confiabilidad del 90%, un factor de drenaje para la capa de rodadura de 1.0, capa de base con asfalto espumado de 1.0 y capa de sub-base de 0.90. Se utilizaron los siguientes parámetros de evaluación de pavimento, serviciabilidad inicial de 4.2 y la serviciabilidad final de 2.20, desviación estándar de 0.45.

Para la obtención del número estructural aportado por la estructura de pavimento existente, se establecen parámetros de evaluación en base al estado actual del tramo y el tipo de ruta, se muestran a continuación.



Tabla X. **Parámetros de Evaluación del pavimento**

- confiabilidad	=	90.0 %
- C.B.R. Diseño	=	21.8%
- ESAL de diseño 10 años	=	1,487,934
- ESAL de diseño 15 años	=	2,481,552
- Desviación Estándar	=	0.50
- Serviciabilidad inicial	=	4.20
- Serviciabilidad final	=	2.20
- Módulo de Resilencia de sub rasante	=	16,350 psi

Fuente: elaboración propia.

Basados en los parámetros de diseño establecidos de acuerdo a lo observado y utilizando el modelo matemático propuesto por la AASHTO '93, obtenemos para la opción de pavimento flexible para el proyecto:

Número estructural requerido 10 años = 2.71

Número estructural requerido 15 años = 2.94

Para encontrar el valor del número estructural aportado, el cual debe ser mayor o igual al número estructural requerido, para compensar las cargas impuestas por los vehículos y la calidad del suelo de sub-rasante, se hará de acuerdo a los coeficientes de capa estimados, espesores y calidad de drenaje de cada capa.

Luego de haber obtenido los coeficientes estructurales de cada una de las capas y los espesores contratados, se aplica la fórmula presentada por la Guía Interina de la AASHTO '93, en la cual el número estructural proporcionado por la estructura está basado a los tipos de material y espesores de cada una de las capas.

Para la determinación del coeficiente estructural de la capa de Sub-base existente, tomamos en cuenta los resultados de los ensayos de laboratorio efectuados a las muestras de material recuperadas, para este caso, mediante el C.B.R. obtenido ubicamos el valor del coeficiente utilizando la figura 6 del capítulo 1, con la cual obtenemos: Coeficiente de capa de sub-base = 0.12.

Según los resultados de laboratorio, el valor de ITS húmedo es de 300 kPa, con 70.6% de ITS retenido.



Para la capa de concreto asfáltico se utiliza la ecuación mostrada anteriormente, en la cual se encuentra el módulo de elasticidad del concreto asfáltico y se obtiene que: Coeficiente de capa concreto asfáltico = 0.40.

El proyecto, en un inicio contaba con una estructura de pavimento compuesta por: carpeta de rodadura de 3 centímetros y base de 23 centímetros en promedio. Recordando que en el reciclado en frío se mezclan en su totalidad la carpeta de rodadura existente y el espesor de base correspondiente, es posible reciclar 15 centímetros entre ambas capas. Atendiendo a lo anterior, el espesor de capa de base sin reciclar será de 11 centímetros, el cual se sumará a la capa de sub-base, dejándola con un espesor total promedio de 20 centímetros.

La propuesta de rehabilitación es la siguiente:

Capa de rodadura de concreto asfáltico	= 05.0 cm
Capa de asfalto espumado	= 15.0 cm
Capa de sub-base existente (Promedio)	= 20.0 cm

Al evaluar la ecuación con el espesor de diseño contratado tenemos:

Capa de rodadura	=	$(0.40) * (1.97'') * (1.0) +$
Capa de Asfalto Espumado	=	$(0.26) * (5.91'') * (1.0) +$
Capa de Sub-Base	=	<u><math>(0.12) * (7.87'') * (0.9) =</math></u>

Número estructural aportado = 3.17

A continuación se muestra una tabla en la cual se listan los resultados obtenidos anteriormente:

Tabla XI. **Comparación entre número estructura requerido y aportado**

<b>Años</b>	<b>NE<sub>requerido</sub></b>	<b>NE<sub>aportado</sub></b>
10	2.71	3.17
15	2.94	3.17

Fuente: elaboración propia.

Observamos que para períodos de diseño de 10 y 15 años, la estructura de pavimento propuesta para la rehabilitación, cumple en que el número estructural aportado (3.17) es mayor que el número estructural requerido (2.71 y 2.94), por lo que es viable la realización de los trabajos.

Resulta de suma importancia tomar en cuenta que, en los lugares en donde no exista capa de sub-base, deben realizarse los trabajos necesarios para lograr el aporte estructural estimado.

A continuación se muestran fotografías del proceso de la rehabilitación del tramo mediante el reciclaje del pavimento existente y la aplicación del asfalto espumado.

En la figura 32, se muestra la preparación de la pista antes de iniciar el reciclado. Se puede observar que en este caso se está aplicando cemento sobre la carpeta de rodadura asfáltica existente en el ancho que abarcará la recicladora.

En la figura 33, se muestra la configuración del tren de reciclaje utilizado para la rehabilitación del tramo. Se puede observar el camión que transporta el tanque con al asfalto para inyectarlo en la maquina recicladora.

Figura 32. **Preparación de la pista para iniciar el reciclado**



Fuente: fotografía proporcionada por la empresa Concal.

Figura 33. **Configuración del tren de reciclado**



Fuente: fotografía proporcionada por la empresa Concal.

En la figura 34, se puede observar la parte posterior del tanque que contiene el asfalto y la manguera que conduce el mismo hacia la máquina recicladora para la producción del asfalto espumado. También se puede observar la máquina recicladora marca Wirtgen.

Figura 34. **Proceso de reciclado y producción de asfalto espumado**



Fuente: fotografía proporcionada por la empresa Concal.

En la figura 35, observamos que seguido del reciclado pasa un rodo compactador inmediatamente después.

Figura 35. **Compactación del material reciclado y estabilizado**



Fuente: fotografía proporcionada por la empresa Concal.

En la figura 36 se muestra el proceso de humectación (aplicación de agua) a la pista ya reciclada, estabilizada con asfalto espumado y compactada para que alcance el nivel de compactación requerido. Posteriormente se hace pasar un rodo para lograr este propósito.

Figura 36. **Humectación de la pista estabilizada con asfalto**



Fuente: fotografía proporcionada por la empresa Concal.

En la figura 37 se muestra el proceso de colocación de la nueva carpeta asfáltica de rodadura y el inmediato chequeo del espesor colocado.

Figura 37. **Colocación de la carpeta de rodadura asfáltica**



Fuente: fotografía proporcionada por la empresa Concal.



## CONCLUSIONES

1. Con base en la experiencia en cuanto al diseño y evaluación de pavimentos, se puede afirmar que una parte fundamental para determinar el tipo de rehabilitación a aplicar en una ruta existente, es la evaluación visual preliminar de la misma. Por medio de esta evaluación preliminar se logra la identificación de las fallas que posea la carpeta asfáltica de rodadura y de estar expuestas, las capas subyacentes.
2. Diversos estudios y proyectos tanto nacionales como internacionales, han demostrado que el reciclado en frío es una opción que provee al pavimento de una importante mejora en cuanto al aporte estructural, ya que la capa de base, al ser mezclada con la carpeta de rodadura, mejora sus características físicas y mecánicas. Así mismo, la aplicación de esta técnica genera un ahorro significativo de recursos, tanto humanos como económicos y reduce considerablemente los impactos ambientales en el proyecto.
3. Aplicada la técnica del reciclado en frío se produce una mejora sustancial a la estructura de pavimento, y esto en conjunto con la estabilización con asfalto espumado el aporte aumenta aún más, proporcionando una capa de base estabilizada con propiedades mecánicas que aseguran un pavimento más duradero. También representa una buena opción para caminos de terracería.

4. Realizar el diseño de la mezcla de materiales con asfalto espumado siguiendo los procedimientos establecidos en las normas y utilizando el equipo adecuado, asegurará la optimización de recursos del proyecto.
  
5. Asegurar el control de calidad de los materiales, del proceso de reciclado, de los agentes estabilizadores a utilizar y del proceso constructivo en sí, proporcionará los resultados esperados de la obra y asegurará que se mantenga en óptimas condiciones para el período de diseño estipulado.

## RECOMENDACIONES

1. Es de suma importancia que durante la evaluación del tramo a rehabilitar mediante la realización de pozos a cielo abierto, se efectúe de forma correcta la toma de espesores y de muestras de las capas existentes en la estructura de pavimento. Esto servirá para determinar los espesores disponibles de las capas de rodadura y de base a reciclar y estabilizar con asfalto espumado, y si surgiera el caso, realizar los ajustes de espesores necesarios.
2. La realización de los ensayos de laboratorio a los materiales existentes, representan una parte fundamental para el reciclado en frío y posterior estabilización con asfalto espumado debido a que con ellos se establecerá la compatibilidad de los mismos y el aporte que puedan dar a la nueva estructura de pavimento. Por tal motivo, se recomienda contar con el equipo de laboratorio necesario para el análisis de los materiales y para el diseño de mezcla con asfalto espumado, así como para llevar un control de calidad efectivo.
3. Es imprescindible conocer las características necesarias para el correcto funcionamiento y manejo de la máquina recicladora con que se cuente, y de los componentes de la misma para obtener un rendimiento óptimo durante la rehabilitación con el reciclado en frío y estabilización con asfalto espumado.

4. Como en todo proyecto de construcción, resulta de suma importancia mantener un estricto control de calidad del proyecto de rehabilitación mediante el reciclado en frío y estabilizado con asfalto espumado. Mantener un buen control de calidad de los materiales a utilizar, de los agentes estabilizadores, de la maquinaria y del proceso constructivo, asegurará el buen funcionamiento del pavimento para el período establecido de vida útil.

## BIBLIOGRAFÍA

1. American Association of State Highways and Transportation Official. Standard Specifications for Transportation Material and Methods of Sampling and Testing, Part 1. 16th ed., AASHTO 1993, 146 p. ISBN: 1-56051-055-2.
2. ANCKERMANN ÁLVAREZ, Enrique. "Manual para laboratoristas de suelos en construcción de carreteras". Trabajo de graduación de Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala 1969. 232 p.
3. Guatemala. Acuerdo Gubernativo 1084-92. Reglamento para el control de pesos y dimensiones de vehículos automotores y sus combinaciones, 30 de diciembre de 1992. 15 p.
4. Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda. Especificaciones Especiales. Unidad Ejecutora de Conservación Vial. Edición 2010. Guatemala 2010. 183 p.
5. Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda. Libro de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes. Edición Noviembre 2001. Dirección General de Caminos. Guatemala, C.A.

6. MORALES ROSALES, Carlos Arnoldo. "Control de calidad en la evaluación de pavimentos asfálticos existentes". Trabajo de graduación de Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala, 2007. 85 p.
7. Wirtgen GmbH. Betún espumado- el ligante innovador para la construcción de carreteras. Wirtgen Group. Primera edición 2001. Alemania: Wirtgen Group. 2001. 30 p.
8. \_\_\_\_\_.Cold Recycling Manual. 2nd. ed. Wirtgen Group. Germany: Wirtgen Group. 2004. 250 p. ISBN: 3-936215-05-7.