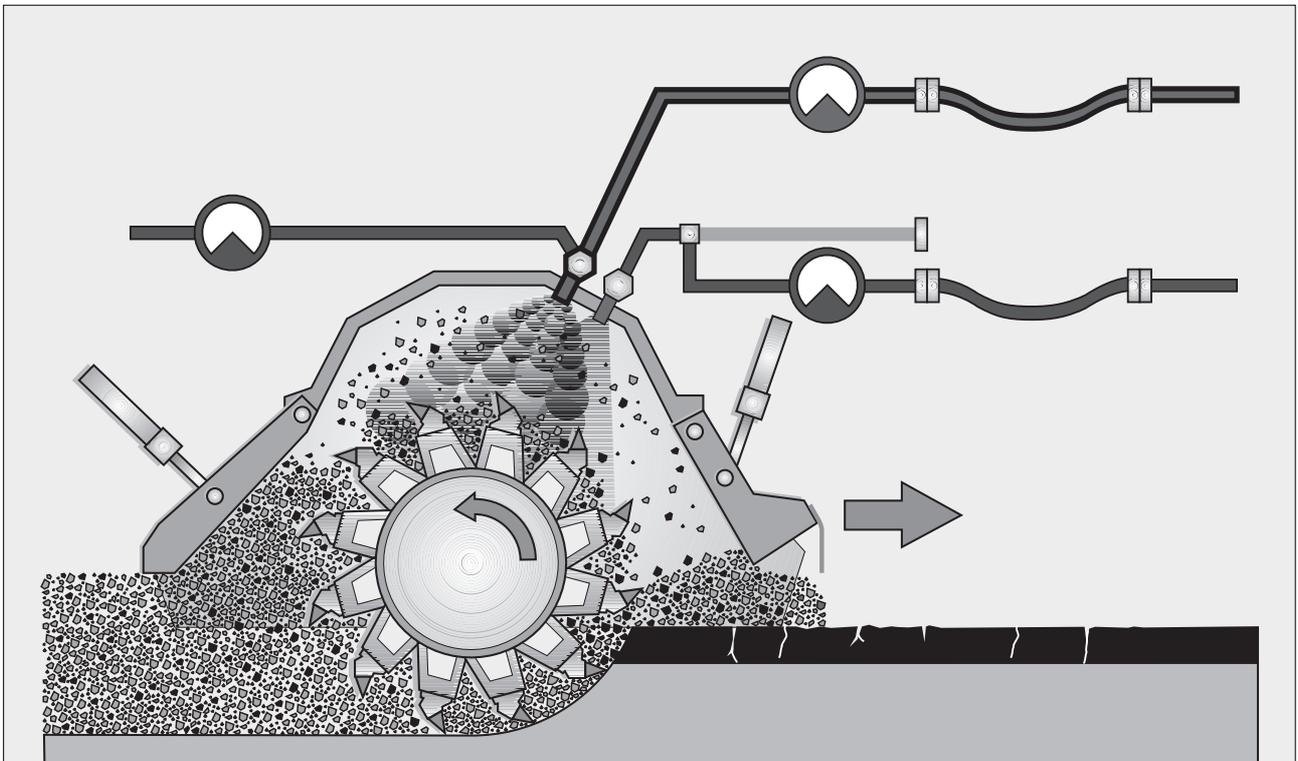
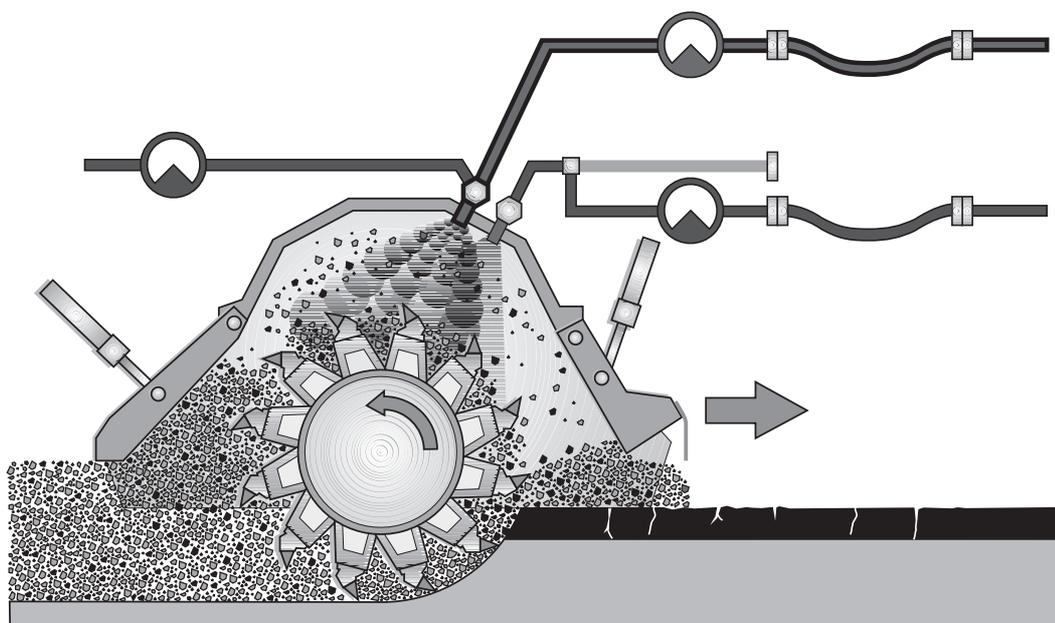


Manual de reciclaje en frío Wirtgen



Manual de reciclaje en frío Wirtgen



Segunda edición revisada, septiembre de 2001

Wirtgen GmbH

Hohner Strasse 2 · 53578 Windhagen · Alemania

Téléfon: +49 (0) 26 45 / 131-0

Telefax: +49 (0) 26 45 / 131-242

ISBN 3-936215-01-4

Edición original ISBN 3-936215-00-6

Segunda edición revisada 2001

Primera edición 1998

Copyright © 1998, 2001 by Wirtgen GmbH.
Todos los derechos reservados. Prohibida la
reproducción total o parcial de esta publicación,
por cualquier medio, sin permiso
escrito de Wirtgen GmbH.

Prefacio

A.A. Loudon & Partners es una prestigiosa firma de ingenieros consultores que se ha especializado en la tecnología aplicable a la rehabilitación de pavimentos. Por más de siete años, esta empresa ha asesorado a los clientes de Wirtgen alrededor del mundo con la aplicación de sus máquinas recicladoras y ha desarrollado un amplio conocimiento en este aspecto.

Wirtgen GmbH desea agradecer a A.A. Loudon & Partners por la asistencia prestada a sus clientes, y en especial por la elaboración del presente manual.

Confiamos en que éste trate muchas de las inquietudes relacionadas con la aplicación de las metodologías de rehabilitación de pavimentos al usar los procesos de reciclaje en frío.

Wirtgen GmbH, Septiembre de 2001

Tabla de Contenido

Introducción	13
Capítulo 1 Pavimentos para carreteras	15
1.1 Generalidades	15
1.2 Condiciones ambientales	15
1.3 Tráfico	16
1.3.1 <i>Concepto de carga equivalente por eje estándar (E.E.)</i>	16
1.3.2 <i>Clasificación del tráfico</i>	17
1.3.3 <i>Predicción del tráfico de diseño</i>	17
1.4 Componentes del pavimento	18
1.4.1 <i>Rodadura</i>	18
1.4.2 <i>Estructura del pavimento</i>	19
1.4.3 <i>Subrasante</i>	20
1.5 Deterioro del pavimento	20
1.6 Mantenimiento y rehabilitación de pavimentos	22
1.7 Opciones de rehabilitación	23
1.7.1 <i>Rehabilitación superficial</i>	23
1.7.2 <i>Refuerzo estructural</i>	24
Capítulo 2 Reciclaje en frío	25
2.1 Generalidades	25
2.2 El proceso de reciclaje en frío	25
2.3 Beneficios del reciclaje en frío	27
2.4 Aplicación de los procesos de reciclaje en frío	28
Capítulo 3 Investigación y diseño del pavimento	29
3.1 Introducción	29
3.2 Categorías de reciclaje en frío	30
3.2.1 <i>Reciclaje profundo</i>	30
3.2.2 <i>Reciclaje superficial o de capas delgadas</i>	32
3.2.3 <i>Mejoramiento de vías no pavimentadas</i>	33
3.3 Investigación del pavimento	34
3.3.1 <i>Estudio de la información disponible</i>	34
3.3.2 <i>Análisis del tráfico de diseño</i>	34
3.3.3 <i>Métodos de investigación</i>	34
3.3.3.1 <i>Inspección visual</i>	34
3.3.3.2 <i>Penetrómetro Dinámico de Cono</i>	35
3.3.3.3 <i>Apiques</i>	36
3.3.3.4 <i>Toma de núcleos</i>	36
3.3.3.5 <i>Medidas de la profundidad de ahuellamiento</i>	36

3.3.3.6	<i>Medidas de deflexiones</i>	36
3.3.3.7	<i>Ensayos de laboratorio</i>	37
3.4	Procedimientos de investigación para las diferentes categorías de reciclaje en frío	37
3.4.1	<i>Reciclaje profundo</i>	37
3.4.2	<i>Reciclaje superficial</i>	37
3.4.3	<i>Mejoramiento de vías en grava no pavimentadas</i>	37
3.5	Diseño de mezclas	38
3.6	Enfoques para el diseño de pavimentos	39
3.6.1	<i>Métodos de diseño basados en el CBR</i>	39
3.6.2	<i>Método de diseño basado en el Penetrómetro Dinámico de Cono</i>	39
3.6.3	<i>Método basados en las deflexiones</i>	40
3.6.4	<i>Métodos racionales de diseño</i>	40
3.6.5	<i>Resumen de los enfoques para el diseño de pavimentos</i>	41
3.7	Estructuras típicas de pavimentos reciclados en frío	41
3.7.1	<i>Generalidades</i>	41
3.7.2	<i>Ejemplo de selección del diseño de pavimento</i>	41

Capítulo 4 Aspectos prácticos y de funcionalidad 45

4.1	Generalidades	45
4.2	Planeación para el reciclaje	46
4.3	Acomodación del tráfico público	48
4.4	Logística	49
4.5	Trabajos preliminares al reciclaje	51
4.5.1	<i>Remoción de obstáculos</i>	51
4.5.2	<i>Conformación de la vía existente antes del reciclaje</i>	52
4.5.3	<i>Importación de material nuevo</i>	52
4.5.4	<i>Fresado preliminar al reciclaje</i>	52
4.6	Juntas y traslapos	54
4.6.1	<i>Juntas longitudinales</i>	54
4.6.2	<i>Juntas longitudinales en vías angostas</i>	55
4.6.3	<i>Juntas transversales</i>	56
4.7	La operación de reciclaje	57
4.7.1	<i>Preparación del tren de reciclaje</i>	57
4.7.2	<i>El inicio</i>	57
4.7.3	<i>Reciclaje</i>	58
4.7.4	<i>Ubicación del material reciclado</i>	58
4.7.5	<i>Compactación</i>	59
4.7.6	<i>Terminado de la superficie</i>	60
4.8	Control de calidad	60

Capítulo 5 Agentes estabilizadores 63

5.1	Tipos de agentes estabilizadores _____	63
5.1.1	<i>Generalidades</i> _____	63
5.1.2	<i>Agentes estabilizadores cementantes</i> _____	64
5.1.3	<i>Agentes estabilizadores bituminosos</i> _____	64
5.2	Estabilización con cemento _____	65
5.2.1	<i>Generalidades</i> _____	65
5.2.2	<i>Agrietamiento del material tratado con cemento</i> _____	65
5.2.3	<i>El trabajo con cemento</i> _____	66
5.2.4	<i>Tráfico temprano</i> _____	67
5.2.5	<i>Criterios para las capas estabilizadas con cemento</i> _____	67
5.3	Estabilización con emulsión asfáltica _____	68
5.3.1	<i>Generalidades</i> _____	68
5.3.2	<i>Tipos de emulsiones asfálticas</i> _____	69
5.3.3	<i>El trabajo con emulsiones asfálticas</i> _____	69
5.3.4	<i>El concepto de la cantidad total de fluidos</i> _____	70
5.3.5	<i>Criterios para las capas estabilizadas con emulsión asfáltica</i> _____	70
5.4	Estabilización con asfalto espumado _____	71
5.4.1	<i>Generalidades</i> _____	71
5.4.2	<i>Características del asfalto espumado</i> _____	72
5.4.3	<i>El trabajo con asfalto espumado</i> _____	73
5.4.4	<i>Criterios para las capas estabilizadas con asfalto espumado</i> _____	75
5.5	Resumen – El cemento y los agentes estabilizadores asfálticos _____	76
5.5.1	<i>Comparación entre las estabilizaciones con cemento y con asfalto</i> _____	76
5.5.2	<i>Características de desempeño</i> _____	77

Lista de referencias 79

Apéndices 83

Apéndice 1 Ejemplos de metodologías de diseño de pavimentos para el reciclaje en frío 85

A1.1	Reciclaje profundo _____	87
A1.2	Reciclaje superficial o de capas delgadas _____	98
A1.3	Mejoramiento de vías en grava no pavimentadas _____	102

Apéndice 2 Procedimientos para el diseño de mezclas 107

A2.1	Procedimiento de laboratorio para diseñar mezclas de materiales estabilizados con cemento _____	109
A2.2	Procedimiento de laboratorio para diseñar mezclas de materiales tratados con emulsión asfáltica _____	112

A2.3 Procedimiento de laboratorio para diseñar mezclas de materiales tratados con asfalto espumado _____	114
A2.4 Aparatos de laboratorio necesarios para diseñar mezclas de materiales estabilizados con cemento _____	120
A2.5 Aparatos de laboratorio necesarios para diseñar mezclas de materiales tratados con emulsión asfáltica o con asfalto espumado _____	123

Apéndice 3 Otros equipos necesarios para el procesamiento de material reciclado	127
--	------------

A3.1 Compactadores _____	129
A3.2 Niveladoras _____	129
A3.3 Esparcidores _____	130
A3.4 Mezcladores de lechada _____	130
A3.5 Carrotanques _____	131
A3.6 Otros _____	132

Apéndice 4 Especificaciones estándar para el reciclaje en frío in-situ	135
---	------------

A4.1 Alcance _____	137
A4.2 Materiales _____	137
A4.3 Planta y equipos _____	138
A4.4 Construcción _____	139
A4.5 Protección y mantenimiento _____	145
A4.6 Tolerancias de construcción _____	145
A4.7 Inspección y ensayos de rutina _____	146
A4.8 Medida y pago _____	147
Ejemplo de un cuadro típico de cantidades _____	149

Apéndice 5 Análisis de costos	151
--------------------------------------	------------

A5.1 Tarifas básicas _____	153
A5.2 Ejemplo de un reciclaje profundo _____	154
A5.3 Ejemplo de un reciclaje superficial o de capas delgadas _____	158
A5.4 Ejemplo de un mejoramiento de una vía en grava no pavimentada _____	160

Introducción

Durante los últimos 50 años se ha presentado un desarrollo sin precedentes en infraestructura, particularmente en la de carreteras. Muchos miles de kilómetros de nuevas carreteras fueron construidas alrededor del mundo para satisfacer la demanda de los volúmenes crecientes de tráfico. Gran parte de estas carreteras han estado en uso por más de dos décadas y han alcanzado el final de su período de diseño, requiriendo por tanto incrementar los esfuerzos en su mantenimiento para conservarlas en niveles de servicio aceptables; adicionalmente, la masa promedio de los vehículos ha aumentado en forma continua a través de los años, al tiempo que numerosos bienes se alejan del tren hacia modos de transporte por carretera, más flexibles y rápidos. Los incrementos en el tráfico y en las presiones de inflado, las mayores cargas por eje y la edad, han contribuido al deterioro de las carreteras.

A medida que se aproxima el cambio de milenio, muchos países enfrentan problemas similares en relación con su red de carreteras. Una creciente porción de los fondos viales se destina a mantener las carreteras existentes, teniéndose en consecuencia menor dinero disponible para las medidas de rehabilitación o para nuevos proyectos. En muchas naciones, simplemente no se cuenta con suficiente dinero para estar al día con las necesidades de mantenimiento, dando lugar a un rápido descenso y a que se requieran medidas de rehabilitación más costosas que las necesarias para restaurar los niveles de servicio. Con frecuencia se considera la construcción de nuevas vías o proyectos de mejoramiento, si la renta de los impuestos justifica la inversión de capital. Esta es una espiral hacia abajo.

Este escenario desolador representa un reto para los ingenieros de carreteras. El Banco Mundial y otras instituciones han demostrado que cualquier nación requiere una infraestructura sólida para su salud económica, y las buenas vías representan una parte vital de ésta; si los fondos disponibles son insuficientes para rescatar la crisis actual, debe encontrarse un método más económico para la rehabilitación de carreteras. Se necesita innovar para encontrar alternativas de construcción que incrementen la efectividad de los recursos existentes, alcanzándose más metros cuadrados de carreteras rehabilitadas por cada dólar gastado. El reciclaje es una de estas alternativas.

El concepto del reciclaje de pavimentos como una medida de rehabilitación de carreteras es relativamente nuevo. Aparte de varios artículos técnicos sobre temas específicos del reciclaje, existe muy poco material publicado para guiar a los ingenieros de carreteras sobre este aspecto. En un esfuerzo de superar esta limitación, A.A. Loudon & Partners publicó su primer libro titulado "Cold deep in-place recycling – technical recommendations and application specifications" en agosto de 1995, gracias al cual se ha recibido valiosa retroalimentación.

Esta segunda edición, recopilada por A.A. Loudon & Partners y publicada por Wirtgen GmbH, es mucho más clara que la primera y se ha ampliado para cubrir tres años adicionales de experiencias prácticas en el reciclaje, con el propósito de superar las deficiencias que se identificaron en la primera publicación. Es un manual de aplicación que se concentra específicamente en el reciclaje en frío in situ de pavimentos flexibles. No se incluyen el reciclaje en planta, el remezclado en caliente de mezclas asfálticas, ni la rehabilitación de pavimentos rígidos o pavimentos de concreto, por ser estos campos especializados.

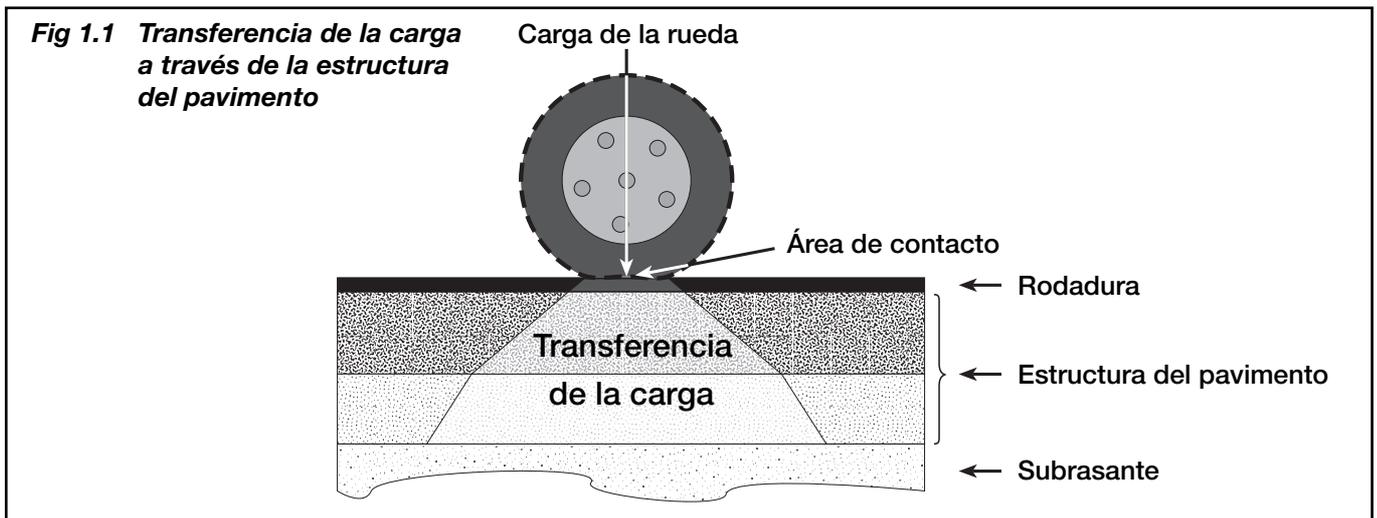
En el primer capítulo es esencialmente un resumen de la tecnología de los pavimentos para carreteras, concentrándose en especial en su propósito y su proceso de deterioro, lo que conduce a las opciones para su rehabilitación e introduce al concepto de reciclaje, que se discute en el Capítulo 2. El diseño es el tema central del Capítulo 3, junto con la investigación del pavimento y el análisis de los materiales, finalizando con una serie de ejemplos de diseño. En el Capítulo 4 se tratan los aspectos prácticos del reciclaje, mientras que en el Capítulo 5 se considera uno de los ingredientes más importantes del reciclaje: los agentes estabilizadores.

Los apéndices contienen información relevante, bastante amplia. En ellos se han incluido, como guías, ejemplos de investigación de pavimentos, los procedimientos estándar para el diseño de mezclas, los equipos complementarios que hacen parte del proceso de reciclaje, las especificaciones estándar y, además, ejemplos de costos para colaborar con los practicantes del reciclaje. La información de los apéndices es altamente relevante de la operación de reciclaje, pero no se incluyó en el documento principal por considerarse que lo podría hacer muy denso.

Capítulo 1: Pavimentos para carreteras

1.1 Generalidades

La superficie, o rodadura, usualmente es la única parte visible de la carretera. La rodadura descansa sobre una estructura de pavimento constituida por varias capas de materiales diferentes, que se extiende a menudo hasta profundidades que superan un metro. La estructura del pavimento es la parte de la carretera que transmite las cargas impuestas por los vehículos sobre la superficie a la “tierra” o material natural subyacente (conocido como la subrasante). Normalmente la subrasante es débil en términos de capacidad portante. Las cargas de alta intensidad, impuestas por el tráfico, se distribuyen en una gran área sobre la subrasante, tal como se muestra en la Figura 1.1.



1.2 Condiciones ambientales

Las carreteras son construidas a través del mundo en todo tipo de climas, desde desiertos secos y cálidos hasta regiones con alta precipitación y condiciones de hielo permanente. Independientemente de las condiciones ambientales, cada carretera es diseñada para soportar las cargas del tráfico por el mismo mecanismo fundamental de transferencia de fuerzas de alta intensidad, impartidas a la superficie por las ruedas de los vehículos, a niveles inferiores de carga que la subrasante pueda soportar sin deformarse.

Las condiciones ambientales afectan a las carreteras esencialmente de dos maneras:

- **La rodadura.** Adicionalmente al tráfico, la superficie de una carretera está expuesta a la luz solar, al viento, a la lluvia, a la nieve y a otros elementos naturales. Las consecuencias de estos elementos sobre las propiedades de la rodadura son de gran importancia y se manifiestan en:
 - Efectos térmicos que causan cambios de volumen a medida que los materiales se expanden o se contraen en respuesta a los cambios de temperatura. El rango en la temperatura diaria de la superficie de una carretera es importante. En áreas desérticas, la superficie de una carretera cubierta con asfalto puede experimentar un cambio de temperatura de más de 50 °C entre el amanecer y el atardecer, mientras que las superficies de las carreteras en el círculo ártico durante el invierno estarán cubiertas por la nieve y permanecen a una temperatura relativamente constante;
 - Efectos de congelamiento que crean el fenómeno conocido como hinchamiento (frost heave). Ciclos repetidos de congelamiento/deshielo causan los mayores daños a las superficies de las carreteras; y
 - Efectos de radiación solar que causan sobre las superficies de las carreteras lo que llamamos insolación (sunburn). Las radiaciones ultravioleta a las que está sujeta la superficie de la carretera generan la oxidación del cemento asfáltico haciéndolo más frágil. Este proceso es conocido como el envejecimiento del asfalto.
- **La estructura del pavimento.** El agua es el mayor enemigo de las estructuras de los pavimentos. La saturación de agua causa a menudo ablandamiento de los materiales, suministrando también una

lubricación entre las partículas cuando la carga es aplicada. La capacidad portante de los materiales en su estado seco es siempre mayor que en su estado húmedo y cuanto más cohesivo (o arcilloso) sea el material más susceptible será a la humedad. De aquí la importancia de prevenir el ingreso del agua a las estructuras de los pavimentos, especialmente a los materiales de baja calidad encontrados en las capas inferiores.

1.3 Tráfico

Los volúmenes proyectados del tráfico y su composición en términos del tamaño y masa de los vehículos, dictaminan, en gran medida, la geometría de la carretera (alineamiento, número de carriles, etc.) y los requerimientos de la estructura del pavimento. Es por lo tanto muy importante ser tan preciso como sea posible en la predicción del tráfico futuro cuando se realiza el diseño de un pavimento.

Los aspectos importantes del tráfico, desde la perspectiva del diseño de pavimentos, son aquellos que permiten la definición de la magnitud y de la frecuencia de las cargas aplicadas a la superficie, que la carretera podrá soportar durante su vida útil. La carga impartida por una rueda a la superficie de una carretera esta definida por tres factores:

- La carga (en kN) realmente soportada por la rueda, la cual, junto con
- La presión de inflado (en kPa) determina la “huella” de la llanta sobre la carretera. Esta huella define el área sobre la superficie la superficie del pavimento que esta sujeta a la carga, y
- La velocidad de viaje que define la frecuencia a la cual la superficie es cargada y descargada.

Los vehículos de pasajeros tienen presiones de inflado en el rango de 180 a 250 kPa y soportan menos de 250 kg por llanta, o de 5 kN sobre un eje. Estas cargas son insignificantes cuando se les compara con las impartidas por los grandes camiones usados para transportar cargas pesadas, las cuales son, generalmente, de 80 kN por eje, con presiones de inflado variando entre 500 a 900 kPa. Lógicamente las cargas de los vehículos pesados tendrán la mayor influencia sobre los requerimientos de resistencia del pavimento.

1.3.1 Concepto de carga equivalente por eje estándar (E.E.)

Las cargas de los vehículos pesados se encuentran normalizadas, y los pavimentos para carreteras se diseñan de acuerdo con ellas. El término “carga legal por eje” es usado para definir la máxima carga permitida por eje simple. Esta carga varía de país a país, típicamente entre 80 kN y 130 kN. Para propósitos de diseño del pavimento, también debe contemplarse la configuración de los ejes del vehículo. Esto se logra considerando la carga de un vehículo pesado en términos de las “Cargas Equivalentes a un Eje Estándar” (E.E.).

La tabla 1.1 puede emplearse como una guía para determinar el Número de Ejes Equivalentes que serán aplicados sobre la superficie de una carretera por diferentes tipos de vehículos pesados. Se debe notar que a los vehículos livianos no se les ha asignado un factor y que por lo tanto no son significativos desde la perspectiva del diseño de pavimentos.

Tabla 1.1 Cargas en Eje Estándar Equivalente por tipo de Vehículo

Tipo de vehículo pesado (cargado)	Número promedio de E.E. por vehículo
Camión de 2 Ejes	0,70
Bus de 2 Ejes	0,75
Camión de 3 Ejes	1,70
Camión de 4 Ejes	1,80
Camión de 5 Ejes	2,20
Camión de 6 Ejes	3,50
Camión de 7 Ejes	4,40

1.3.2 Clasificación del tráfico

Para propósitos del diseño del pavimento (contrario al diseño geométrico), normalmente el tráfico se clasifica de acuerdo con el número de E.E. que se espera solicitarán la carretera durante su vida de diseño. Este concepto introduce un marco de tiempo que requiere la definición del “período de diseño”. Normalmente los propietarios de una carretera esperan un retorno de la inversión realizada en el pavimento, y para efectos de este cálculo emplean períodos que varían entre 5 y 20 años. Este período de retorno es entonces el usado para definir el período de diseño del pavimento. La predicción del tráfico de diseño (o del número de E.E. esperados durante este período) se trata en la siguiente sección.

En el diseño de pavimentos, los términos “liviano/medio/pesado” son demasiado subjetivos para utilizarlos por sí solos como un sistema de clasificación del tráfico. Por tal razón, éste se clasifica en términos del número de E.E., como se muestra en la Tabla 1.2.

En pavimentos que prestan un servicio extrapesado, tales como los construidos en autopistas y carreteras para el transporte minero, se requiere definir una clase de tráfico ultrapesado. Éstos se encuentran fuera del alcance del presente manual y pueden considerarse como pavimentos para aplicaciones especiales.

Clase de tráfico	Número de E.E.	Descripción
0	Menor de 0.3×10^6	Muy liviano
1	0,3 to 1×10^6	Liviano
2	1 to 3×10^6	Liviano / medio
3	3 to 10×10^6	Medio
4	10 to 30×10^6	Pesado
5	30 to 100×10^6	Muy pesado

1.3.3 Predicción del tráfico de diseño

Para estimar la magnitud del tráfico y el número de E.E. que usarán la vía durante su período de diseño, se emplean datos históricos, cuando éstos se encuentran disponibles. La expresión para determinar el tráfico de diseño tiene en cuenta el Tráfico Promedio Diario Anual (TPDA), el porcentaje de tráfico pesado (H), el número de E.E. promedio por vehículo pesado y el factor de crecimiento del tráfico (f_y).

Fórmula 1.1

$$\text{Tráfico de diseño} = \text{TPDA} \times \text{H} \times \text{E.E.} \times f_y$$

Tanto el TPDA como el H a menudo se determinan a partir de conteos previos. Cuando no se cuenta con tal información, deben realizarse conteos físicos o electrónicos durante un período de tiempo representativo.

Los conteos de tráfico deben incluir el número total de vehículos por día que viajan en cada carril (en cada dirección), discriminados de acuerdo con el tipo de vehículo. La clasificación de la carretera y la tecnología disponible, normalmente, dictaminarán si hay que realizar conteos electrónicos; hoy en día se dispone de métodos sofisticados para cuantificar el número de ejes y el peso de los vehículos en movimiento, pero debido a su alto costo sólo se usan en carreteras importantes. Los conteos físicos son los más populares, y dependiendo del nivel de competencia de las personas que los realicen, puede obtenerse información confiable, ordenando los vehículos pesados en diferentes clases (de acuerdo con su número de ejes) y anotando cuándo se encuentran cargados o descargados.

En razón de que la filosofía del diseño de pavimentos está basada en la carga legal por eje, el grado de

sobrecarga de los vehículos es un dato muy importante. Las sobrecargas causan daños severos a los pavimentos y cualquier dato al respecto deberá obtenerse de las autoridades competentes. En ausencia de información confiable, es recomendable hacer una valoración mediante sondeos de carga. Debe pesarse físicamente una muestra representativa de los vehículos pesados para determinar el número (o porcentaje) de ellos que se encuentran sobrecargados y el grado de sobrecarga. Estos resultados pueden extrapolarse para toda la población de vehículos pesados.

La fórmula 1.2 para determinar el factor de crecimiento del tráfico (f_y) tiene como datos de entrada la tasa de crecimiento anual del tráfico (i), expresada en porcentaje, y el período de diseño (y), en años:

Fórmula 1.2

$$f_y = 365 \times \frac{(1 + 0,01 \times i) \{ (1 + 0,01 \times i)^y - 1 \}}{0,01 \times i}$$

De manera alterna, el factor de crecimiento del tráfico (f_y) puede leerse en tablas estándar, como la 1.3. No obstante, allí no se incluyen todos los valores de las variables i y y , debiéndose tener cuidado al hacer estimaciones entre valores, ya que una interpolación o extrapolación directa puede arrojar valores imprecisos.

Tabla 1.3 Factor de crecimiento del tráfico (f_y)

Período de diseño y (años)	Tasa de crecimiento del tráfico				
	2 %	4 %	6 %	8 %	10 %
4	1534	1611	1692	1776	1863
6	2348	2517	2698	2891	3097
8	3195	3497	3829	4192	4591
10	4076	4557	5099	5710	6398
15	6438	7600	9005	10703	12756
20	9045	11303	14232	18039	22995

Cuando se está estimando la tasa de crecimiento anual del tráfico (i), deben identificarse otros factores diferentes de los económicos normalmente usados. El mejoramiento de una carretera en afirmado y la rehabilitación del pavimento a menudo atraen el tráfico que por lo general utilizaría rutas alternas.

En el Apéndice 1 se incluye un ejemplo en el que se muestra cómo puede usarse la fórmula para determinar el tráfico de diseño en un proyecto.

1.4 Componentes del pavimento

Como ya se ha indicado, los pavimentos están constituidos por tres componentes principales: la rodadura, la estructura y la subrasante. Cada una de ellas tiene propósitos específicos, por lo que a continuación se considerarán por separado.

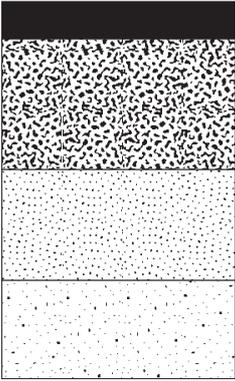
1.4.1 Rodadura

La rodadura es la conexión del pavimento con el tráfico y el ambiente, y su función es proteger la estructura de estos agentes, suministrándole durabilidad e impermeabilidad.

- **Protección del tráfico.** La rotación de las llantas afecta a la rodadura de dos maneras:
 - Los esfuerzos impartidos por las ruedas cargadas sobre la superficie del pavimento son predominantemente verticales; sin embargo la componente horizontal puede llegar a ser significativa, especialmente en las esquinas, en las pendientes pronunciadas o en las zonas de frenado de los vehículos. Las características de resistencia de los materiales empleados en la rodadura deben ser tales que puedan soportar todos estos esfuerzos sin romperse o deformarse.

- La acción de arrastre de las llantas, en particular mientras están girando, tiende a pulir la superficie. Con el tiempo, el resultado de este efecto es una reducción de las propiedades de fricción (resistencia al deslizamiento) de la superficie, haciéndola más deslizante o resbaladiza, sobre todo cuando se encuentra húmeda, y llega a ser peligrosa.
- **Protección del ambiente.** Como se describió en la sección 1.2, la rodadura está sujeta continuamente a dos formas de ataque del ambiente: los efectos térmicos y la radiación solar. Por tanto, se requiere que una rodadura tenga las siguientes propiedades:
 - Elasticidad que le permita contraerse o expandirse de manera repetida con los cambios de temperatura.
 - Durabilidad para absorber el bombardeo diario de las radiaciones ultravioleta, sin sufrir envejecimiento prematuro.

El asfalto es el material comúnmente empleado en las rodaduras, debido a que les suministra flexibilidad, durabilidad y mayor impermeabilidad. Por lo general, se usan mezclas asfálticas en caliente (con un contenido de asfalto aproximado del 5 %) para rodaduras de alta calidad en carreteras de tráfico pesado, mientras que en vías de tráfico liviano se aplican tratamientos superficiales, que resultan más económicos.

Fig 1.2 Capas típicas del pavimento	Posición en la estructura	Materiales de construcción
	Rodadura	Mezcla asfáltica / sello
	Base	Mezcla asfáltica / Estabilizada con asfalto / Estabilizada con cemento / granular
	Subbase	Estabilizada con asfalto / Estabilizada con cemento / granular
	Subrasante	Estabilizada con cemento / granular / material natural

1.4.2 Estructura del pavimento

La estructura del pavimento transfiere las cargas desde la superficie hasta la subrasante. Como se muestra en la Figura 1.1, la carga aplicada por la rueda a la superficie se reduce de manera efectiva a través de la estructura, la cual la distribuye en una mayor área sobre la subrasante. Dicha estructura consiste invariablemente de varias capas de materiales que poseen características de resistencia diferentes, cada una de las cuales distribuye la carga que recibe en su parte superior, sobre una mayor área en su parte inferior. Las capas superiores de la estructura están sujetas a mayores niveles de esfuerzo que las capas inferiores y, por tanto, deben construirse con materiales más resistentes. En la Figura 1.2 se muestran los tipos de materiales que se usan comúnmente en las estructuras de pavimentos.

La respuesta de un material a las cargas impuestas depende en gran medida de sus propiedades elásticas y de las características de la carga (magnitud, velocidad de aplicación, etc.). Este tema corresponde a un área de especialización que se encuentra fuera del alcance de un manual de reciclaje en frío, pero los aspectos más importantes son:

- Materiales granulares, que incluyen piedra triturada y gravas, transfieren las cargas aplicadas a través de sus partículas individuales o de su esqueleto. La fricción entre partículas mantiene la integridad estructural, pero bajo cargas repetidas (a menudo asociadas a un incremento en

el contenido de humedad) ocurre un proceso de densificación gradual a medida que las partículas se mueven, aproximándose entre sí. Lo anterior puede ocurrir a cualquier nivel dentro de la estructura del pavimento, ocasionando una deformación de la superficie, la cual se manifiesta como un ahuellamiento en la trayectoria de las ruedas de los vehículos.

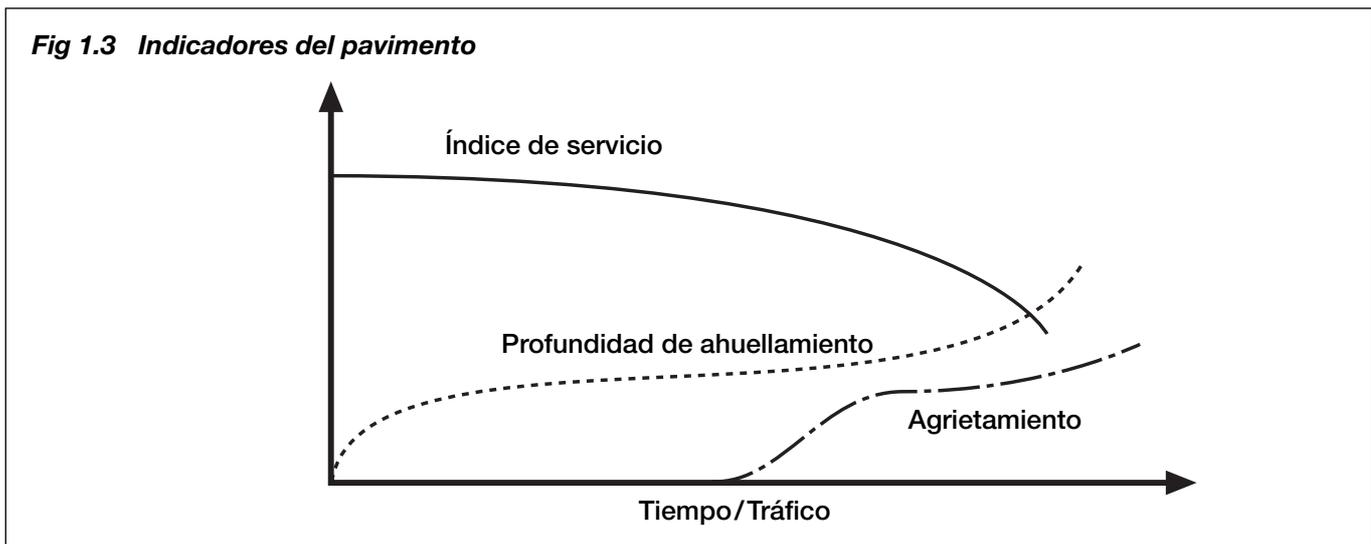
- Materiales ligados, que incluyen materiales estabilizados y mezclas asfálticas, se comportan de manera similar a una placa. Las cargas verticales aplicadas en la superficie de la placa generan esfuerzos horizontales de compresión en las fibras superiores y esfuerzos de tensión en las fibras de la mitad inferior de la placa, presentándose los esfuerzos máximos en la superficie y en la base de la capa. Las deformaciones resultantes de estos esfuerzos, en particular las causadas por la tensión en la base, conducen a la falla por fatiga de la placa, debido a muchas repeticiones de carga. Las grietas que se presentan en la base de la capa se propagan verticalmente a medida que continúan las repeticiones de carga.

Tanto las deformaciones que se presentan en el material natural, como las grietas por fatiga que ocurren en los materiales ligados, están relacionadas con el número de repeticiones de carga. Esto permite determinar la vida de servicio de un pavimento en función del número de veces que éste puede cargarse antes de alcanzar la “falla”, conocida como la “capacidad estructural” del pavimento.

1.4.3 Subrasante

El material que soporta la estructura del pavimento puede corresponder a uno natural (condición de corte) o a uno transportado (condición de relleno). Sus características de resistencia dictaminan el tipo de estructura de pavimento requerida para distribuir las cargas aplicadas en la superficie, hasta alcanzar magnitudes que puedan soportarse sin presentar deformación permanente.

En los métodos de diseño de pavimentos usualmente la resistencia y la rigidez de la subrasante son los datos de entrada y el objetivo que se persigue es dotar la estructura con una resistencia suficiente para proteger la subrasante. El valor empírico de la Relación Californiana de Soporte (CBR) de la subrasante constituye una de las herramientas más antiguas usadas para determinar los requerimientos del pavimento. En general, se requieren estructuras de gran espesor para proteger subrasantes débiles. Los mayores espesores a menudo se alcanzan con la adición de capas de “subrasante seleccionadas”.



1.5 Deterioro del pavimento

Los pavimentos se deterioran por diferentes razones, entre las cuales las dos más importantes son los efectos del ambiente y las cargas de tráfico. Normalmente el deterioro de los pavimentos se mide de manera indirecta valorando el índice de servicio, teniendo en cuenta aspectos visibles tales como la profundidad de las roderas o del ahuellamiento y el agrietamiento de la superficie. En la Figura 1.3 se puede ver cómo estos tres aspectos se relacionan con el transcurso del tiempo y con el efecto acumulativo de las cargas del tráfico.

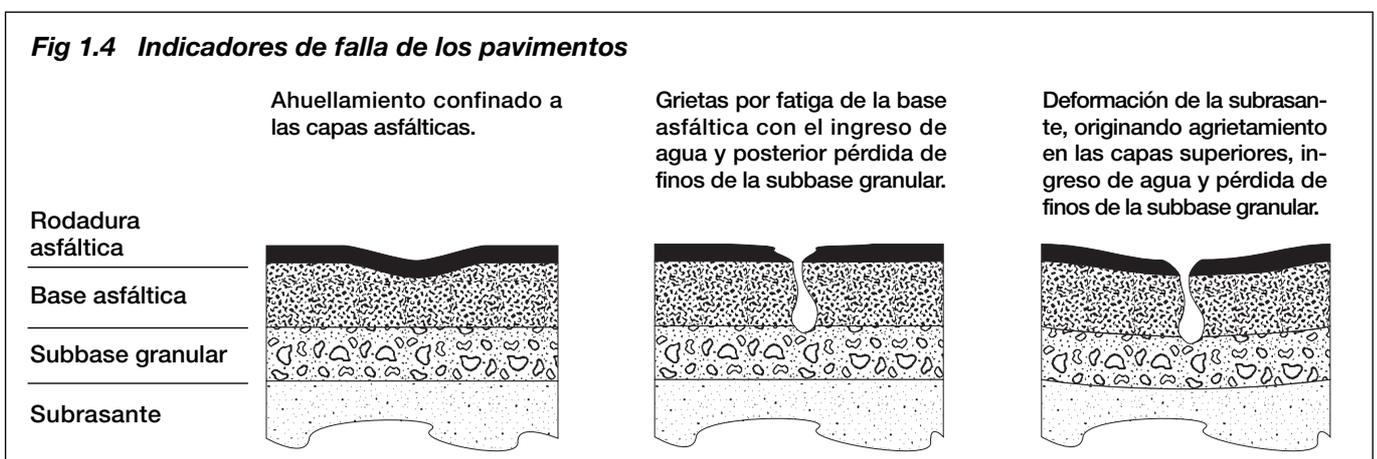
El deterioro gradual de los pavimentos es causado por diferentes motivos, tales como:

- Factores ambientales, los cuales son responsables de la mayor parte de las grietas que se inician en la superficie. El factor que más contribuye a este fenómeno es la radiación ultravioleta de la luz solar, que causa un endurecimiento lento y continuo del cemento asfáltico. Con el endurecimiento se presenta una reducción en la elasticidad, que origina el agrietamiento cuando la superficie se contrae a medida que se enfría. Una vez que la integridad de la superficie se ha perdido por el agrietamiento, el pavimento tiende a deteriorarse a una mayor velocidad debido al ingreso del agua.
- Cargas del tráfico, responsables del desarrollo de roderas o ahuellamientos y de las grietas que se inician dentro de la estructura del pavimento. Cada vehículo que usa una carretera causa una pequeña deformación temporal en la estructura del pavimento. Las deformaciones ocasionadas por los vehículos livianos son insignificantes, mientras que los vehículos con cargas pesadas producen deformaciones relativamente grandes. El paso de muchos vehículos tiene un efecto acumulativo que conduce de modo gradual a la deformación permanente o al agrietamiento por fatiga. Los ejes sobrecargados generan una magnitud desproporcionada de daño a la estructura del pavimento, acelerando su deterioro. Este deterioro es causado principalmente por dos mecanismos diferentes dentro de la estructura del pavimento:
 - Deformación permanente originada por la densificación, en la que los esfuerzos repetidos generan un acercamiento de las partículas individuales dentro de la capa del pavimento y dan lugar a una reducción de los vacíos. En los materiales granulares, tal disminución conduce a un incremento en la resistencia (materiales densos son más resistentes), mientras que en las mezclas asfálticas se aplica lo contrario. Una reducción en el contenido de vacíos en las mezclas asfálticas no solamente produce ahuellamiento en la trayectoria de las ruedas, sino además que el asfalto se comience a comportar como un fluido, creando un medio para que se generen presiones hidráulicas a causa de las cargas impuestas, ocasionando desplazamiento lateral, o deslizamiento a lo largo de los bordes de las huellas.
 - Grietas por fatiga de los materiales ligados, las cuales se inician en la parte inferior de la capa, en donde la deformación por tensión causada por las cargas de las ruedas es máxima. Estas grietas se propagan a la superficie. La deformación permanente de los materiales subyacentes aumenta de manera desproporcionada dicha condición, al incrementar la deformación por tensión impuesta por las cargas de las ruedas.

Después que la grieta penetra a través de la rodadura, el agua puede ingresar en las capas subyacentes de la estructura del pavimento. Como se describió previamente, el efecto ablandador del agua conduce a una reducción de la resistencia que, ocasiona un incremento en la velocidad de deterioro bajo cargas repetidas.

Además, el agua en materiales saturados transforma las cargas verticales de las ruedas en presiones que rápidamente erosionan la estructura de un material granular y causan el descubrimiento de los agregados por el asfalto (stripping). En estas circunstancias la fracción fina de los materiales del pavimento se expulsa a través de las grietas hacia la parte superior (fenómeno conocido como bombeo), dando lugar a que se desarrollen mayores vacíos dentro del mismo. Baches y un deterioro rápido del pavimento van apareciendo aceleradamente con la falla de su estructura.

En la Figura 1.4 se muestran tres de las formas más comunes de fallas en los pavimentos.



Cuando la temperatura disminuye por debajo de los 4 °C, el agua libre en el pavimento se expande, desarrollando presiones, aun en ausencia de cargas impuestas por las ruedas de los vehículos. El hinchamiento por congelación generado por los ciclos de hielo / deshielo es el peor escenario para un pavimento agrietado, y da lugar a su destrucción.

En condiciones secas o desérticas, las grietas en la rodadura conducen a diferentes tipos de problemas. En la noche, cuando la temperatura es relativamente baja (a menudo por debajo de la de congelamiento), la superficie se contrae, causando la apertura de las grietas que actúan como un refugio para la arena transportada por el viento. Durante el día, cuando la temperatura se eleva, la expansión de la rodadura está restringida por la arena atrapada dentro de las grietas, generándose mayores fuerzas horizontales que ocasionan fallas localizadas en los bordes de las mismas. Finalmente, estas fuerzas pueden producir el levantamiento de la rodadura en la vecindad de las grietas, haciendo muy pobre la calidad de operación de los vehículos.

La ausencia de tráfico es una causa más del agrietamiento de las rodaduras, particularmente en las capas asfálticas delgadas, ya que la acción de amasado del tráfico mantiene vivo el asfalto; además su oxidación y el endurecimiento siguiente generan grietas térmicas que se inician en la superficie de la capa asfáltica. La aplicación de esfuerzos repetidos a la capa asfáltica da lugar a deformaciones suficientes para cerrar las grietas a medida que éstas se forman, previniendo su propagación.

1.6 Mantenimiento y rehabilitación de pavimentos

Las actividades de mantenimiento de los pavimentos se concentran normalmente en no dejar entrar el agua y alejarla de la estructura del pavimento. Esto implica conservar la rodadura en estado impermeable y asegurar que las medidas de drenaje sean efectivas, de tal manera que el agua no pueda estancarse a lo largo del borde de la carretera.

Normalmente el agua ingresa en la estructura del pavimento por la parte superior, a través de las grietas de la rodadura, a menudo ayudada por el estancamiento del líquido en la superficie; por tanto, a medida que aparecen las grietas éstas deben sellarse, así como arreglar los bordes de la carretera para promover el escurrimiento del agua. Si se registra de manera temprana, pueden tratarse efectivamente los efectos de envejecimiento mediante la aplicación de un riego ligero de emulsión asfáltica diluida. Condiciones más serias requieren la aplicación de un tratamiento superficial en caso de volúmenes de tráfico bajos o de sobrecapas delgadas de mezclas convencionales en caliente.

Tales medidas, cuyo objetivo es mantener la flexibilidad y la durabilidad de la rodadura, están concentradas en solucionar el deterioro generado por el ambiente. Las deformaciones y las grietas por fatiga debidas a las cargas del tráfico no pueden tratarse de manera efectiva mediante las actividades de mantenimiento superficial y requieren alguna forma de rehabilitación.

El deterioro de los pavimentos es, por lo general, un proceso relativamente lento. Los indicadores discutidos en la sección 1.5 (y mostrados en la Figura 1.3) pueden usarse para observar la velocidad del deterioro. Las autoridades de carreteras normalmente emplean un sistema de base de datos, conocido como un Sistema de Administración de Pavimentos (PMS), para observar continuamente la calidad de operación de todas las carreteras dentro de su malla vial, y enfocan su atención en aquellas que más lo requieran. En la Figura 1.5 se muestra un gráfico típico de un PMS, indicando la efectividad de un mantenimiento oportuno y de las medidas de rehabilitación.

La Figura 1.5 resalta la importancia de tomar medidas a tiempo para mantener la calidad de servicio tan alta como sea posible, aunque esto depende de la velocidad de deterioro: cuanto peor sea la calidad de servicio, más rápida será la velocidad de deterioro. A medida que disminuye la calidad de servicio, las soluciones deberán ser mayores, así como sus costos.

Los métodos más comunes para tratar este tipo de problemas incluyen:

- Colocación, sobre la superficie existente, de una carpeta delgada (aproximadamente 40 mm) de mezcla asfáltica en caliente. Esta es la solución más simple a un problema superficial, debido a que el tiempo requerido para completar los trabajos es corto y existe un impacto mínimo sobre los usuarios de la vía. Usualmente se emplean ligantes asfálticos modificados con el propósito de mejorar el comportamiento y alargar la vida de la nueva carpeta. Sin embargo, varias carpetas nuevas incrementan la cota superficial de la vía y pueden causar problemas de drenaje y de acceso.
- Fresado y remplazo, conocido como “afeitado de la vía”. En este método se retiran las capas afectadas por el agrietamiento y se remplazan con mezclas asfálticas frescas, a menudo fabricadas con ligantes modificados. El proceso es relativamente rápido debido a las altas capacidades de producción de las máquinas fresadoras modernas. El problema se soluciona con la capa asfáltica, en tanto que los niveles del pavimento se mantienen.
- Reciclar el material del pavimento existente (reciclaje poco profundo o superficial), el cual puede realizarse en planta; transportar el material fresado a una planta de tratamiento, o en el sitio, aplicando procesos en frío o en caliente. El objetivo principal de este tipo de reciclaje es rejuvenecer el ligante envejecido del pavimento existente. Adicionalmente, las propiedades de la mezcla reciclada pueden modificarse mediante la incorporación de materiales nuevos.

1.7.2 Refuerzo estructural

La rehabilitación para resolver problemas de la estructura del pavimento normalmente se trata como una solución a largo plazo. Al resolver los problemas estructurales, debe recordarse que la estructura del pavimento es la que tiene fallas y no necesariamente los materiales que la constituyen.

La densificación (o consolidación) de los materiales granulares es, de hecho, una forma de mejoramiento, debido a que a mayor densidad de un material, mejores serán sus características de resistencia; sin embargo, la densificación causa problemas en las capas superiores, especialmente en aquellas construidas con materiales ligados.

Como regla, el objetivo de la rehabilitación estructural es maximizar el valor de recuperación del pavimento existente. Esto infiere que el material que se ha densificado no debe alterarse. La continua acción de amasado por el tráfico tardó varios años para alcanzar este estado y los beneficios que ofrece tal densificación deben utilizarse donde sea posible.

Entre las opciones más populares para la rehabilitación estructural, se encuentran:

- Reconstrucción total. Esta es la opción preferida cuando se combina la rehabilitación con una decisión de mejoramiento que demanda un cambio significativo en el alineamiento de la carretera. La reconstrucción esencialmente implica botar todo y comenzar de nuevo. Cuando se tienen altos volúmenes de tráfico es preferible construir una vía alterna sobre un alineamiento separado, para evitar problemas de acomodación del tráfico.
- Construcción de capas adicionales (ya sean de materiales granulares o de mezclas asfálticas) sobre la superficie existente. Con frecuencia la colocación de capas asfálticas gruesas donde los volúmenes de tráfico son altos es la solución más fácil para los problemas estructurales. Sin embargo, como ya se indicó, un incremento en el nivel superficial entraña problemas de drenaje y de acceso.
- Reciclaje hasta la profundidad en que se presentan los problemas, creando una capa gruesa y homogénea, con características de resistencia superiores. En aquellos casos en que el pavimento va a mejorarse significativamente, pueden ponerse capas adicionales sobre las recicladas. Usualmente se agregan agentes estabilizadores a los materiales reciclados, en especial cuando el material existente en el pavimento es marginal y se requiere su refuerzo, pues el objetivo del reciclaje es recuperar al máximo el pavimento existente. Además de recuperar los materiales de las capas superiores, la estructura del pavimento por debajo del nivel de reciclaje permanece igual.

El propósito de considerar múltiples opciones es determinar la solución más económica. El resto de este manual está enfocado a suministrar información suficiente, junto con aproximaciones de diseño que permitirán incluir el reciclaje como una de estas opciones.

Capítulo 2: Reciclaje en frío

2.1 Generalidades

En este capítulo se tratan las operaciones de reciclaje, en especial los equipos usados para llevar a cabo el reciclaje en frío. Adicionalmente, se dan ejemplos típicos de los diferentes equipos que se necesitan para las aplicaciones de reciclaje, así como de agentes estabilizadores.

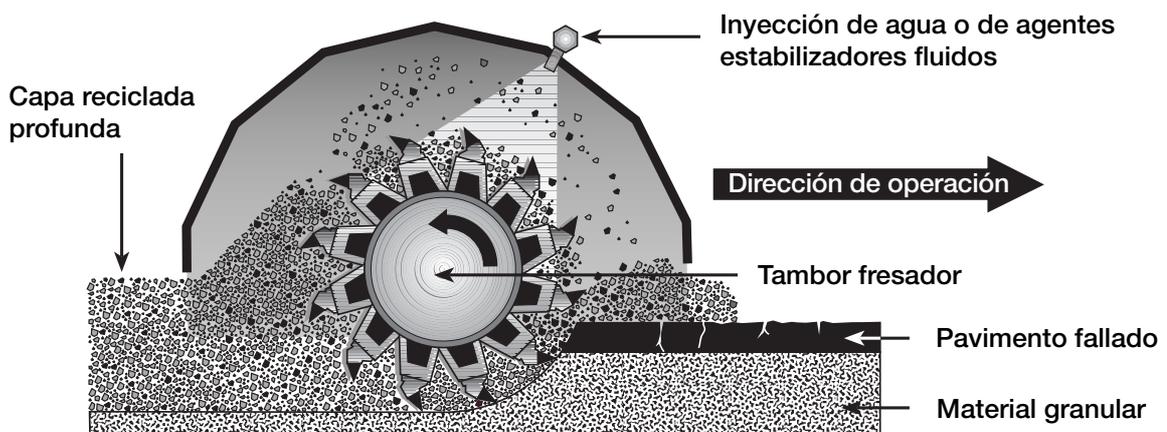
Igualmente, se habla sobre los beneficios obvios e intangibles que se logran usando este tipo de proceso y se discute la importancia de tener en cuenta los factores locales que afectan los proyectos de reciclaje en frío.

2.2 El proceso de reciclaje en frío

A través de los años se ha evolucionado constantemente, desde las máquinas fresadoras modificadas y estabilizadoras de suelos hasta las recicladoras especializadas actuales. Debido a que estas últimas están especialmente diseñadas para reciclar en una sola pasada capas de pavimento de gran espesor, las máquinas modernas tienden a ser grandes y potentes, y pueden estar montadas sobre orugas (como la 2200 CR), o sobre llantas neumáticas de alta flotación (como la WR 2500).

El corazón de estas máquinas es el tambor fresador / mezclador, el cual se encuentra equipado con numerosas herramientas especiales de corte. El tambor gira y fresa el material existente en el pavimento de la carretera, tal como se ilustra en la Figura 2.1.

Fig 2.1 Configuración del tambor fresador / mezclador y de los sistemas de inyección



A medida que tiene lugar el proceso de fresado, se envía el agua desde un tanque acoplado a la máquina recicladora, a través de una manguera flexible, y se inyecta dentro de la cámara de mezclado de la recicladora. El agua se dosifica de manera precisa con un sistema de bombeo controlado por un microprocesador, y se mezcla con el material fresado para alcanzar el contenido óptimo de humedad de compactación.

Agentes estabilizadores fluidos, tales como lechadas de cemento / agua o emulsiones asfálticas, pueden introducirse directamente en la cámara de mezclado de manera individual o combinada. Así mismo, puede inyectarse asfalto espumado dentro de la cámara de mezclado mediante una barra irrigadora separada, especialmente diseñada para este propósito.

Delante de la máquina recicladora normalmente se ponen, sobre la superficie existente, agentes estabilizadores en polvo, tales como el cemento Portland. Al pasar la máquina sobre el polvo, lo mezcla con el agua dentro del material subyacente en una sola operación.

El tren de reciclaje puede configurarse de manera diferente, según la aplicación y el tipo de agente estabilizador que se use. En cada caso la máquina actúa jalando o empujando los equipos que están acoplados a ella, mediante barras de tracción o barras guía. En las Figuras 2.2, 2.3 y 2.4 se muestran trenes típicos de reciclaje.

El tren de reciclaje que se muestra en la Figura 2.2 se suele usar cuando se llevan a cabo operaciones de reciclaje con cemento, en las que la recicladora empuja la mezcladora de lechada que se encuentra por delante de ella. En la mezcladora se juntan de manera precisa, en cantidades predeterminadas, el agua y el cemento, que luego se transfieren a través de una manguera flexible y se inyectan dentro de la cámara mezcladora de la recicladora. De manera alterna, en lugar de emplear una mezcladora de lechada, puede colocarse el cemento en forma de polvo delante de la máquina recicladora.

Después del reciclaje, el material recibe una pasada inicial de un compactador de rodillos para consolidarlo. Posteriormente se perfila con una motoniveladora, antes de ser compactado con un rodillo vibratorio.

Fig 2.2 Tren típico de reciclaje con cemento y emulsión bituminosa usando una máquina sobre llantas



Cuando se usa emulsión asfáltica junto con el cemento puede configurarse un tren similar de reciclaje, excepto que se tendrá un tanque con la emulsión delante del mezclador de lechada. En aquellos casos en los que el cemento se coloque en forma de polvo delante del tren de reciclaje, el tanque con emulsión se acopla directamente a la recicladora, como se ilustra en la Figura 2.3.

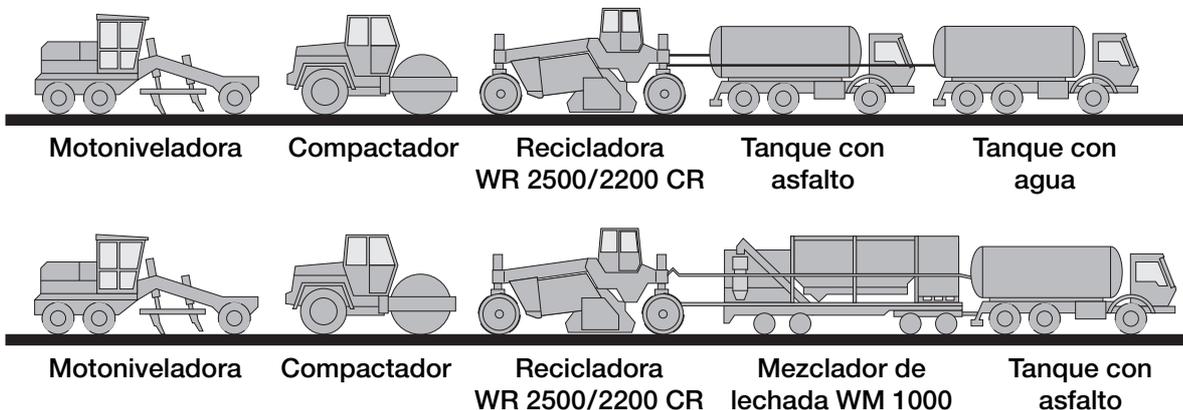
Fig 2.3 Tren típico de reciclaje con emulsión asfáltica usando una máquina montada sobre orugas



En esta ilustración se describe una máquina recicladora montada sobre orugas. Esta configuración se usa cuando se realizan trabajos de reciclaje poco profundos, en los cuales el pavimento existente consiste en capas asfálticas gruesas y el reciclaje se efectúa dentro de las mismas. Si la máquina recicladora está provista de una plantilla pavimentadora, puede que no sea necesario emplear una motoniveladora para perfilar la superficie.

En la figura 2.4 se muestran dos trenes típicos usados para el reciclaje con asfalto espumado.

Fig 2.4 Tren típico de reciclaje con asfalto espumado, solo o combinado con cemento



Cuando se emplea únicamente asfalto espumado, lo cual puede realizarse cuando se reciclan pavimentos que incluyen carpetas asfálticas o piedras trituradas de buena calidad, la recicladora empuja dos tanques delante de ella: el primero de éstos lleno con cemento asfáltico caliente y el segundo con agua. Cuando se utiliza asfalto espumado y cemento, este último puede agregarse en forma de lechada, usando una mezcladora, o distribuido sobre la superficie existente en forma de polvo, delante del tren de reciclaje.

2.3 Beneficios del reciclaje en frío

Con el uso del reciclaje en frío pueden lograrse varios beneficios, algunos de ellos muy evidentes, mientras que otros tienden a ser menos tangibles:

Ambientales. Se usa totalmente el material del pavimento existente. No hay que ubicar botaderos y se minimiza el volumen de material nuevo que tiene que importarse desde las canteras. Reduce cicatrices en las montañas, causadas por la explotación de las canteras y de materiales de préstamo. El flujo de transporte es mucho menor. Además, el consumo de energía promedio se reduce significativamente, así como el efecto de daño sobre la malla vial debido a los vehículos que transportan los materiales.

Calidad de las capas recicladas. Se asegura un mezclado de los materiales existentes con el agua y los agentes estabilizadores, consistente y de alta calidad. La adición de los fluidos es precisa gracias a los sistemas de bombeo controlados por microprocesador. Una mezcla excelente tiene lugar debido a que los componentes se mezclan vigorosamente dentro de la cámara mezcladora.

Integridad estructural. El reciclaje en frío produce capas ligadas gruesas, homogéneas y que no poseen conexiones débiles entre capas delgadas de pavimento, como se encuentra algunas veces en los pavimentos construidos convencionalmente.

Inalterabilidad de la subrasante. Ocurre una menor alteración de las subrasantes de calidad pobre, en comparación con la rehabilitación de pavimentos en la que se emplean equipos de construcción convencionales. El reciclaje en frío es una operación de una sola pasada, con las orugas de la recicladora (en el caso de usar recicladoras montadas sobre orugas), o con las ruedas de alta flotación (en el caso de emplear máquinas de ruedas neumáticas), pasando una sola vez sobre la subrasante expuesta. Cuando se utiliza equipo convencional las subrasantes están sujetas a altos y repetidos esfuerzos de carga, que a menudo dan lugar a condiciones de “levantamiento” y a la necesidad de excavar y rellenar con material importado.

Menor tiempo de construcción. Comparadas con otros métodos de rehabilitación, las máquinas recicladoras modernas son capaces de operar con altas tasas de producción que acortan significativamente los tiempos de construcción, suministrando así un beneficio intangible a los usuarios de la carretera al reducir el tiempo en que se interrumpe el tráfico en un proyecto específico.

Seguridad del tráfico. Uno de los beneficios más importantes de este proceso es el alto nivel de seguridad que puede alcanzar el tráfico, ya que el tren de reciclaje completo puede acomodarse dentro del ancho de un solo carril. Por ejemplo, en carreteras de dos carriles las operaciones de reciclaje pueden llevarse a cabo, durante el día, a lo largo de la mitad del ancho de la vía y todo el ancho, incluyendo el carril reciclado, puede darse al servicio al atardecer.

Economía. Los anteriores beneficios se combinan para hacer del reciclaje un proceso muy atractivo para rehabilitar un pavimento de manera económica.

2.4 Aplicación de los procesos de reciclaje en frío

Cuando se considera la rehabilitación de un pavimento deteriorado, el método más económico de reparación tiende a ser más específico del proyecto que para construcciones nuevas. Cada proyecto es único desde el punto de vista de la estructura del pavimento existente y de la calidad de los materiales que constituyen las capas del pavimento y la subrasante. Resulta por tanto importante encontrar la solución más apropiada y práctica para cada proyecto, teniendo en cuenta factores tales como:

Región. La solución más efectiva para un país o una región en particular está influida por el ambiente local. Por ejemplo, si el proyecto corresponde a una vía urbana altamente transitada, en la cual sólo pueden efectuarse los trabajos en la noche, o si es una vía rural no pavimentada de bajo volumen de tráfico que requiere urgentemente su mejoramiento. En estos dos casos extremos se necesitan soluciones y estándares de servicio muy diferentes. Por eso hay que tomar conciencia de las condiciones locales para la construcción de carreteras, así como también de la percepción de los pobladores de la región en lo referente al nivel de servicio que ellos consideran aceptable.

Ambiente físico. La topografía y la geología deberán tomarse en cuenta cuando se determina el método de rehabilitación más apropiado. Particularmente, la pendiente longitudinal dictaminará el tipo de construcción posible. El clima tiene una parte vital en la escogencia más apropiada, además de que se requerirán soluciones diferentes para regiones desérticas con un volumen bajo de precipitaciones, comparadas con aquellas necesarias en áreas de alta pluviosidad. El efecto de temperaturas extremas, tales como grietas térmicas inducidas por ciclos de congelamiento/deshielo, también tenderá a influir en la aplicación más adecuada.

Disponibilidad de materiales. La factibilidad de las diferentes opciones de reciclaje se encuentra significativamente influida por la disponibilidad de materiales, en especial de agentes estabilizadores, por lo cual deben procurarse cantidades suficientes que sean consistentes y de calidad aceptable. Las recicladoras modernas emplean grandes volúmenes de agentes estabilizadores y, por tanto, es necesario determinar si estos productos se pueden suministrar y despachar de manera oportuna.

Capítulo 3: Investigación y diseño del pavimento

3.1 Introducción

Debido a su estrecha relación, en este capítulo se combinan la investigación de las carreteras deterioradas y las fases del diseño del pavimento para su rehabilitación. Siempre hay que tener en cuenta las siguientes reglas de oro:

- **Debe entenderse claramente que espera el propietario del pavimento rehabilitado. Esto significa:**
 - ¿Requiere un período de diseño a corto o a largo plazo?
 - ¿Cuáles estándares se esperan de las propiedades de funcionalidad, tales como el índice de servicio y la resistencia al deslizamiento?
 - ¿Qué nivel de recursos se destinará para el mantenimiento rutinario del pavimento en su período de diseño? Por ejemplo, ¿se espera que no haya mantenimiento por un largo tiempo durante dicho período? ¿Cuáles son las capacidades de mantenimiento local, desde el punto de vista de la mano de obra, equipos y conocimientos?
- **Debe llevarse a cabo una investigación que permita adquirir un adecuado nivel de entendimiento sobre el comportamiento del pavimento existente. Este requerimiento gobernará en gran medida el tipo y frecuencia de los ensayos necesarios para cada proyecto en particular.**

El propósito de este estudio es obtener información suficiente para desarrollar un diseño de rehabilitación apropiado. Para un proyecto específico, el tipo y extensión de los trabajos de investigación del pavimento variarán significativamente, según lo que se requiera; por este motivo resulta esencial la interacción entre la investigación y el diseño.

Estos diseños pueden realizarse para satisfacer una amplia variedad de carreteras: desde vías en grava no pavimentadas, con tráfico liviano, hasta autopistas de múltiples carriles, con tráficos muy pesados. Igualmente, se pueden llenar los requerimientos específicos de los propietarios de la vía en cuanto al período de diseño y los estándares de funcionalidad.

En este capítulo se describen, en detalle, las tres categorías fundamentales del reciclaje en frío y se cubren los métodos de investigación comúnmente usados, aplicables a cada categoría. Así mismo, se emplean diagramas de flujo para ilustrar la metodología requerida para cada categoría; se dispone de varios métodos de diseño de pavimentos, con diferentes niveles de confianza en cuanto a la seguridad del diseño, y se presenta un breve resumen de algunos de los métodos más populares de diseño de pavimentos. Sin embargo, debe hacerse énfasis en que no se pretende cubrir en detalle los métodos de diseño; por esta razón, se incluye una lista de referencias que suministrarán información completa sobre los mismos.

En la sección final de este capítulo se incluyen catálogos con diseños típicos del pavimento. El Apéndice 1 contiene ejemplos de las metodologías de investigación y de diseño de pavimentos, aplicables a cada categoría de reciclaje. Por último, se hace una selección de las diferentes opciones de diseño y de la alternativa más económica, basada en un análisis comparativo de costos.

3.2 Categorías de reciclaje en frío

El reciclaje en frío puede dividirse en tres categorías: reciclaje profundo, reciclaje superficial o de capas delgadas y mejoramiento de vías en grava no pavimentadas. En muchos casos, no existe una diferencia clara entre los dos primeros tipos de reciclaje, y es bastante usual algún traslapeo de estos dos enfoques.

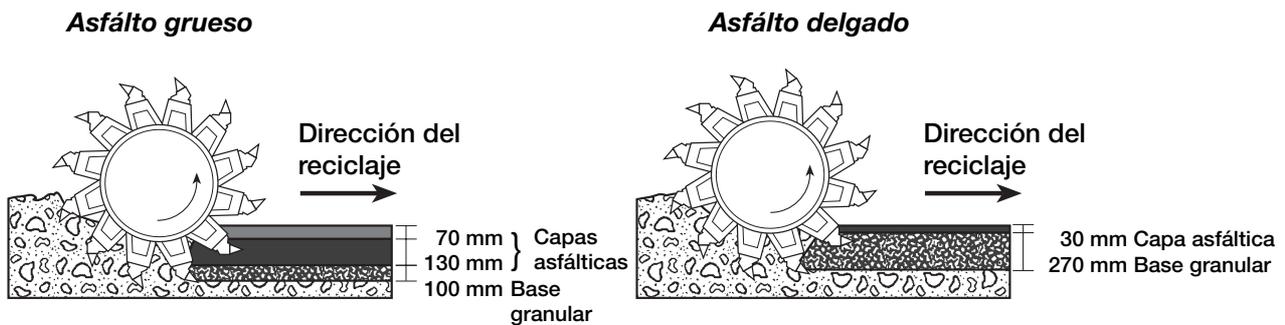
3.2.1 Reciclaje profundo

El reciclaje profundo abarca un amplio espectro de aplicaciones y cubre estrategias de diseño a mediano y largo plazos, con el propósito de reforzar el pavimento que está deteriorado. Los revestimientos sobre la superficie de la capa reciclada mejoran las propiedades de funcionalidad, tales como la resistencia al deslizamiento y el índice de servicio. Los espesores típicos del reciclaje profundo superan los 150 mm.

El reciclaje profundo resulta adecuado para reforzar los pavimentos deteriorados que tienen capas asfálticas gruesas o delgadas. En la Figura 3.1 se indican dos ejemplos de reciclaje profundo. En ambos casos la profundidad de reciclaje es de 300 mm, pero el del lado izquierdo tiene una capa asfáltica gruesa mientras que en el del lado derecho la capa asfáltica es relativamente delgada.

Una vez realizado el reciclaje, se requiere un revestimiento nuevo; para vías con tráfico liviano, este revestimiento puede ser un sello o una carpeta asfáltica delgada de mezcla en caliente. En las situaciones en las que el pavimento soportará tráfico pesado, puede necesitarse una base asfáltica, así como una rodadura asfáltica.

Fig 3.1 Reciclaje profundo a 300 mm con diferentes espesores de capa asfáltica



La metodología para la investigación y diseño del pavimento con reciclaje profundo se describe en el diagrama de flujo de la Figura 3.2.

Fig 3.2 Diagrama de flujo que detalla la metodología para la investigación y el diseño del pavimento en el caso de un reciclaje profundo

Pasos

①

Acuerdo con el propietario de la vía sobre:

- Período de diseño
- Estándares de funcionalidad
- Recursos para el mantenimiento
- Consideraciones prácticas de construcción

②

Recopilación de la información disponible sobre:

- Diseño del pavimento original
- Espesores y calidad reales de las capas
- Fuentes locales de agregados
- Información del tráfico

③

¿La información es suficiente para estimar el tráfico de diseño?

No

Desarrollar conteos de tráfico

Calcular el tráfico de diseño

④

Implementar una investigación apropiada del pavimento

⑤

¿Los resultados de la investigación son suficientes para predecir el comportamiento del pavimento y aplicar los procedimientos de diseño?

No

Profundizar en la investigación

¿Los materiales de las capas superiores del pavimento pueden reciclarse sin incorporar agregado importado?

No

Investigar las alternativas de fuentes de materiales

⑥

Aplicar los procedimientos de diseño de pavimentos para obtener las opciones preliminares de rehabilitación, entre ellos el reciclaje en frío

Desarrollar una comparación preliminar de costos, incluyendo el reciclaje en frío con el uso de diferentes agentes estabilizadores, basados en las propiedades asumidas

⑦

¿El reciclaje en frío resulta económico en comparación con las otras alternativas de rehabilitación?

No

Contemplar otras alternativas de rehabilitación

⑧

Llevar a cabo el diseño de la mezcla en el laboratorio para verificar las propiedades del material reciclado

⑨

Finalizar el diseño del pavimento y los análisis de costos de construcción de la rehabilitación del pavimento con el uso del reciclaje en frío

3.2.2 Reciclaje superficial o de capas delgadas

El reciclaje superficial se lleva a cabo como un medio para eliminar el agrietamiento severo de las capas asfálticas y, a su vez, mejorar el índice de servicio. Frecuentemente se desarrolla esta categoría de reciclaje como una estrategia a corto plazo, pero también puede usarse en aquellos pavimentos en los que las capas asfálticas superiores son débiles. Los espesores del reciclaje superficial varían entre 80 y 150 mm.

Con el reciclaje superficial, puede existir un ligero mejoramiento de la capacidad estructural del pavimento, debido al efecto del revestimiento asfáltico que normalmente se aplica sobre la capa tratada. La limitación al ingreso de agua a las capas inferiores también tenderá a prolongar la vida del pavimento.

En la Figura 3.3 se muestra, en un diagrama de flujo, la metodología para la investigación y para el diseño del reciclaje superficial.

Fig 3.3 Diagrama de flujo que detalla la metodología de investigación y diseño de pavimentos para reciclaje superficial

Pasos

①

Acuerdo con el propietario de la vía sobre:

- Período de diseño (posiblemente una estrategia de diseño a corto plazo)
- Estándares de funcionalidad
- Consideraciones prácticas de construcción

②

Recopilación de información sobre:

- Diseño del pavimento original
- Espesores y calidad reales de las capas
- Fuentes locales de agregados
- Información del tráfico

③

Implementar una investigación apropiada del pavimento

④

¿Los resultados de la investigación son suficientes para evaluar diferentes alternativas?

No

Profundizar en la investigación

Realizar comparación de costos para:

- Sobrecarpetas asfálticas
- Fresado y remplazo
- Reciclaje en frío

⑤

¿El reciclaje en frío resulta económico en comparación con las otras alternativas de rehabilitación?

No

Contemplar otras alternativas de rehabilitación

⑥

Llevar a cabo diseños de mezcla en el laboratorio para determinar las propiedades del material reciclado

¿Se requieren agregados adicionales?

Sí

Muestreo de fuentes de agregados

⑦

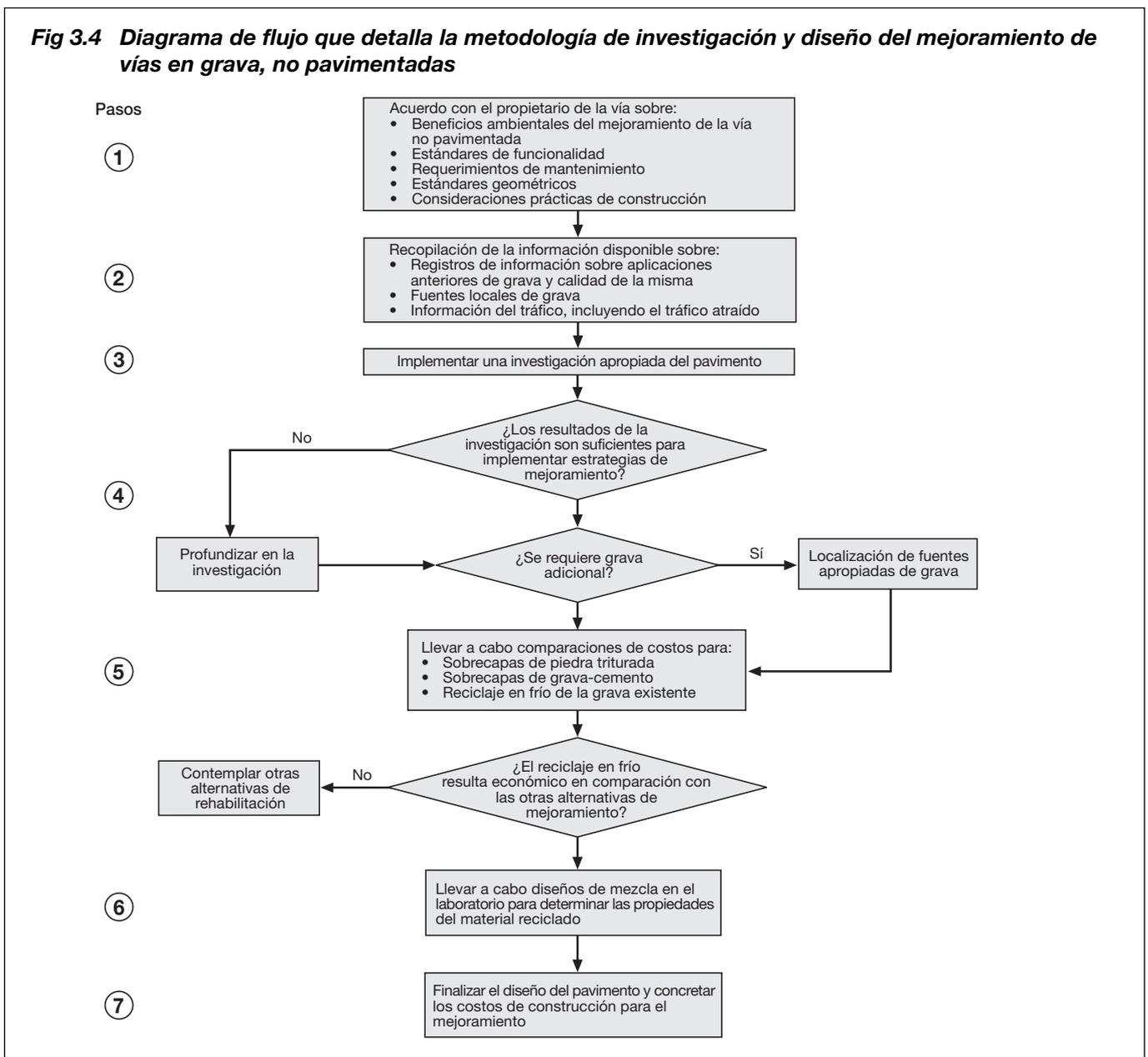
Finalizar el diseño del pavimento y concretar los costos de construcción para el reciclaje superficial

3.2.3 Mejoramiento de vías no pavimentadas

El mejoramiento de vías en grava no pavimentadas a la categoría de pavimentadas puede realizarse mediante el reciclaje de la grava existente, bien sea con emulsión o con cemento asfáltico espumado, y con la aplicación de un tratamiento delgado, tal como un sello o una lechada asfáltica. Las ventajas de estas medidas incluyen beneficios obvios como la seguridad debida al tránsito libre de polvo durante la estación seca y una superficie más segura y firme en la estación de lluvias. Se obtiene una mejor utilización de los recursos puesto que no se requiere reemplazar la grava a intervalos regulares; a causa de la acción del tráfico y del clima, es común que las vías no pavimentadas pierdan entre 20 y 30 mm de grava cada año. Se eliminan los daños ambientales ocasionados por la necesidad de abrir fuentes de préstamo de grava. Esta categoría de reciclaje normalmente se ejecuta sobre espesores que oscilan entre 100 y 150 mm. Cabe anotar que es posible reciclar las vías de grava no pavimentadas usando cemento o cal hidratada, pero en este caso el espesor requerido de la capa reciclada es del orden de los 200 mm, lo cual lleva a la categoría del reciclaje profundo.

En la Figura 3.4 se muestra en un diagrama de flujo los pasos de la metodología que hay que seguir para la investigación y el diseño del mejoramiento de las vías en grava, no pavimentadas.

Fig 3.4 Diagrama de flujo que detalla la metodología de investigación y diseño del mejoramiento de vías en grava, no pavimentadas



3.3 Investigación del pavimento

La investigación del pavimento comprende la recopilación de la información disponible, los análisis de tráfico y la implementación de métodos adecuados de auscultación, con el objeto de obtener suficientes datos para realizar el diseño del pavimento. En esta sección se revisan dichos aspectos.

3.3.1 Estudio de la información disponible

Antes de tomar decisiones finales con respecto al tipo y frecuencia de los diferentes métodos de investigación que deberán usarse para un proyecto en particular, tiene que efectuarse un estudio de toda la información pertinente disponible. Vale la pena indagar si el proyecto cae dentro de un sistema de gerencia de pavimentos, y de ser así, éste podría suministrar información útil.

Los registros de construcción, de estar disponibles, deben estudiarse para determinar:

- El diseño del pavimento originalmente especificado;
- Los espesores de las capas construidas, junto con cualquier cambio en los diseños especificados del pavimento;
- Los resultados de los procesos y ensayos de control de calidad desarrollados durante la construcción; y
- Las fuentes y la calidad de los materiales disponibles en las canteras y zonas de préstamo locales.

Debe recopilarse la mayor información posible sobre el tráfico con el objeto de realizar indagaciones sobre:

- Conteos de tráfico históricos y actuales;
- Porcentaje de vehículos pesados;
- Cargas legales por eje; y
- Estadísticas de sobrecarga de los vehículos.

3.3.2 Análisis del tráfico de diseño

En el capítulo 1 se trataron los métodos usados para calcular el tráfico de diseño. La información disponible debe usarse completamente, pero si ésta no es suficiente, sobre todo al realizar diseños de pavimentos para vías con tráfico pesado, han de llevarse a cabo conteos de tráfico por categorías. Es importante obtener un estimativo preciso del porcentaje de vehículos pesados que usarán la vía, así como del espectro de cargas transportadas por estos vehículos.

Los análisis detallados del tráfico son esenciales en los diseños de pavimentos en los que se consideran estrategias a mediano o largo plazo, es decir, cuando el período de diseño es de diez años o mayor. Rara vez se requieren análisis elaborados del tráfico para estrategias a muy corto plazo; en estos casos es necesaria la información sobre los volúmenes de tráfico con el objeto de planear los trabajos para reducir las alteraciones al mismo y las congestiones durante la construcción.

La información usada para calcular el número de E.E. acumulados (tráfico de diseño) no es exacta; por tanto, usualmente se requiere llevar a cabo un análisis de sensibilidad para investigar cómo los cambios en los datos influyen en el tráfico de diseño.

3.3.3 Métodos de investigación

Existen diferentes métodos de investigación disponibles, los cuales deben seleccionarse apropiadamente teniendo en cuenta diferentes enfoques de diseño. En muchos casos los resultados de varios ensayos pueden compararse entre sí con el propósito de confirmar las razones del deterioro o de la falla del pavimento y, de esta manera, entender mejor el comportamiento del mismo.

En las siguientes secciones se tratan brevemente los métodos más usados.

3.3.3.1 Inspección visual

Esta es una de las herramientas más poderosas para la rehabilitación de pavimentos y forma parte esencial de toda la investigación. La inspección visual se efectúa generalmente en dos fases:

- **Inspección visual inicial.**

Con este tipo de inspección se pretende obtener una impresión general del proyecto y definir los límites de secciones homogéneas, en las que se tengan tipos y niveles similares de deterioro. La inspección visual inicial generalmente se lleva a cabo conduciendo a baja velocidad por la longitud total de la vía.

- **Inspección visual detallada.**

La longitud total de la vía se inspecciona, donde sea práctico, caminando por ella. Se toman notas detalladas de las fallas que ocurren a través de toda la sección transversal del pavimento, y se anotan otras observaciones, tales como el drenaje, cambios geológicos y aspectos geométricos (por ejemplo: pendientes, curvaturas, terraplenes). En caso de que lo anterior no resulte práctico debido a la longitud del proyecto, la inspección visual debe realizarse sobre muestras tomadas de cada sección uniforme que se haya identificado.

Modo de deterioro	Tipo de deterioro
Deformación	Ahuellamiento, depresiones, abultamientos
Agrietamiento	Piel de cocodrilo, en mapa, en bloque, longitudinales, transversales
Desintegración de la superficie	Baches, desmoronamiento, parches, rotura de bordes
Lisura de la textura superficial	Exudación, pulimento

Se reconocen cuatro modos diferentes de deterioro y éstos a su vez se clasifican en tipos, como se muestra en la tabla 3.1.

Durante la inspección visual los diferentes modos y tipos de falla del pavimento se describen en función de su severidad, frecuencia y localización. La inspección suministra indicios importantes sobre las causas de la falla del pavimento, en especial si sus resultados se combinan con los obtenidos con otros métodos de investigación. En el Apéndice 1 se incluye un formato con un ejemplo típico de inspección visual.

3.3.3.2 Penetrómetro Dinámico de Cono

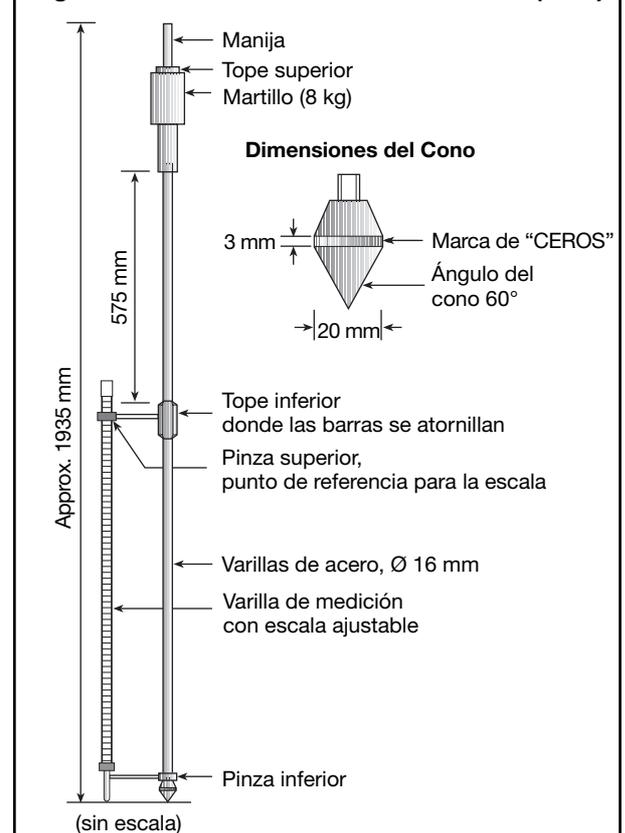
El Penetrómetro Dinámico de Cono (DCP) es una herramienta bastante simple que consiste en una varilla de acero con una punta cónica hecha de acero endurecido, la cual se introduce en el pavimento mediante golpes de un martillo que se deja caer desde una altura estándar. Las medidas que se toman corresponden a la tasa de penetración por golpe a través de las capas del pavimento, tasa que es función de la resistencia in situ del pavimento.

Normalmente, el ensayo se lleva a cabo hasta una profundidad de 800 mm, lo que permite dibujar un perfil que indica las propiedades reales de los materiales que constituyen las capas del pavimento.

En materiales granulares, las medidas del DCP correlacionan bien con el valor ampliamente conocido de la Capacidad Portante de California (CBR) y en materiales ligeramente cementados se correlacionan bien con la resistencia a la compresión confinada (UCS). Los resultados del DCP se pueden usar también para estimar el módulo de elasticidad de los materiales del pavimento.

En la actualidad se dispone de sofisticados programas de computador que facilitan los análisis de los ensayos con el DCP y permiten estimar los valores del CBR in situ, de la UCS y de los módulos elásticos, así como tener un indicativo del balance del pavimento y de su capacidad estructural. En el Apéndice 1 se presentan algunos ejemplos.

Fig 3.5 Penetrómetro Dinámico de Cono (DCP)



3.3.3.3 Apiques

Los apiques representan una parte importante de la investigación del pavimento. Además de ganar una apreciación visual útil del material de las capas del pavimento expuesto en las paredes del apique, facilitan la toma de muestras para ensayos de laboratorio en los que se determine la calidad del material existente en las capas del pavimento y para el diseño de mezclas, de cuyos resultados se puede establecer el tratamiento más efectivo para los materiales que van a reciclarse.

Los apiques también permiten determinar:

- Los espesores de las capas del pavimento;
- Los contenidos de humedad *in situ*;
- Medidas precisas de la compactación *in situ* de cada capa; y
- El estado de las diferentes capas (por ejemplo: su grado de agrietamiento y de cementación).

Los apiques se excavan por lo general en la trayectoria externa de las ruedas en un carril de tráfico, pero en algunos casos pueden realizarse en otros sitios, como por ejemplo a lo largo de una berma fallada de la carretera. Igualmente pueden excavar en forma de trinchera, a lo ancho de un carril de tráfico con el objeto de investigar la profundidad a la cual se extiende la deformación bajo la capa de rodadura. La profundidad típica de los apiques es de 1 m. El material excavado de cada capa se amontona por separado en la vecindad del apique. A medida que se progresa en la excavación, se realizan ensayos de densidad sobre cada capa sucesiva.

Una vez que se ha excavado totalmente el apique, se registra de manera detallada el perfil y se toman muestras representativas de cada capa para los ensayos de laboratorio.

3.3.3.4 Toma de núcleos

Las ventajas de las tomas de núcleos en comparación con los apiques radican en que son relativamente más rápidas, causan una menor alteración del tráfico y son mucho más económicas. Los núcleos de muestras permiten realizar una verificación precisa de los espesores de los materiales ligados, tales como mezclas asfálticas o agregados cementados y pueden ensayarse rápidamente para determinar sus propiedades.

La desventaja de las perforaciones normalmente radica en que la profundidad de muestreo está limitada a los 200 o 300 mm superiores del pavimento y tanto los agregados no ligados como los suelos no pueden muestrearse en forma apropiada, debido a la pérdida usual de material durante este proceso. En muchos casos es imposible determinar de manera precisa el espesor de las capas no ligadas usando este método.

3.3.3.5 Medidas de la profundidad de ahuellamiento

Las medidas de la profundidad de ahuellamiento pueden realizarse manualmente, con el uso de una regla (por lo general de dos metros de longitud) que se coloca en forma transversal a la trayectoria de las ruedas, en cada carril de tráfico. Se registra la máxima profundidad de ahuellamiento, así como el ancho de éste.

La profundidad del ahuellamiento también puede medirse con equipos móviles sofisticados que emplean técnicas con láser.

3.3.3.6 Medidas de deflexiones

Las medidas de las deflexiones son una herramienta importante en la investigación no destructiva del pavimento. Cuando la carga de la rueda de un vehículo en movimiento se aplica sobre la superficie del pavimento se presenta una deflexión. La magnitud de la deflexión y la forma de la cuenca de deformación producida por la carga son útiles para investigar las propiedades *in situ* del pavimento.

Se han desarrollado varios métodos para medir la respuesta de un pavimento bajo carga y se usan como medios para obtener la condición estructural y la capacidad de soporte de carga. Entre los sistemas de medida de deflexiones ampliamente usados se incluyen la Viga Benkelman y aquellos basados en el principio de caída libre de una masa.

En este último método se requiere un impulso dinámico para simular el efecto de una rueda en movimiento usando un equipo como el deflectómetro de impacto. A distancias fijas, desde un punto sobre el cual se aplica la carga, se miden de manera simultánea las deflexiones, lo cual permite establecer la superficie de la deformación y la cuenca de deflexiones. Las medidas de deflexiones pueden emplearse en diferentes métodos de diseño, como se trata en la sección 3.6.3, “Métodos basados en las deflexiones”.

3.3.3.7 Ensayos de laboratorio

Las muestras tomadas de los apiques, así como los núcleos, se someten a ensayos de laboratorio para determinar la calidad de los materiales existentes en las capas del pavimento y de los materiales de la subrasante. También deben someterse a los mismos ensayos las muestras de los agregados tomadas de las zonas de préstamo y de las canteras que se usarán en las mezclas con el material reciclado.

Los ensayos típicos incluyen análisis por tamizado, plasticidad y Capacidad de Soporte de California (CBR).

Los resultados de estos ensayos se usan tanto para la selección de los agentes estabilizadores más apropiados (como se discute en la sección 3.5, “Diseño de mezclas”), como para la evaluación de la capacidad estructural del pavimento existente (como se describe en la sección 3.6, “Enfoques al diseño de pavimentos”).

3.4 Procedimientos de investigación para las diferentes categorías de reciclaje en frío

En la sección 3.3 se trataron todos los métodos usados normalmente para la investigación de pavimentos deteriorados. Sin embargo, rara vez se utilizan todos estos métodos en un proyecto específico, pues la categoría de reciclaje es la que dictamina el nivel de investigación requerido. Lo siguiente se incluye como una referencia rápida de los métodos de investigación más aplicables para cada categoría de reciclaje.

3.4.1 Reciclaje profundo

- Inspección visual
- Apiques y toma de muestras para ensayos de laboratorio
- Toma de núcleos
- Pruebas con el Penetrómetro Dinámico de Cono (DCP)
- Medidas de la profundidad de ahuellamiento
- Medidas de deflexiones

3.4.2 Reciclaje superficial

- Inspección visual
- Verificación del espesor de las capas asfálticas, normalmente por medio de la toma de núcleos
- Medidas de la profundidad de ahuellamiento
- Ejecución de apiques hasta la profundidad de reciclaje propuesta con el objeto de tomar muestras para los diseños de las mezclas

3.4.3 Mejoramiento de vías en grava no pavimentadas

- Inspección visual
- Verificación del espesor de la capa de grava
- Ensayos con el Penetrómetro Dinámico de Cono (DCP)
- Muestreo de la grava para determinar su calidad y realizar los diseños de mezclas

Al decidir el método que hay que utilizar, debe tenerse presente que cada proyecto es único y que el objetivo de los trabajos de investigación es obtener información suficiente que permita formular un diseño apropiado del pavimento. Adicionalmente a la investigación del pavimento, deben evaluarse las fuentes de materiales y los productos requeridos en el proceso de rehabilitación, tales como gravas, piedras trituradas, agua, cemento y ligantes asfálticos. (Lo anterior normalmente implicará visitas a las fuentes locales y a las zonas de explotación de gravas y toma de muestras para ensayarlas en el laboratorio. También deben tomarse muestras de cemento y de ligantes asfálticos, para su ensayo.)

3.5 *Diseño de mezclas*

El diseño de mezclas es una parte esencial de la investigación del pavimento, cuyo propósito es establecer el método más efectivo para tratar los materiales de la capa por reciclar.

Las muestras representativas tomadas de la capa por reciclar se someten a ensayos para el diseño de la mezcla. Las muestras deben prepararse para simular, lo más cercanamente posible, la gradación alcanzada en el material durante el proceso real de reciclaje; si es posible, debe emplearse una máquina frezadora pequeña para triturar el material del pavimento. En algunas circunstancias, dependiendo de la calidad del material por reciclar, así como de las propiedades requeridas del producto final, resulta necesario que este material se mezcle con agregados importados.

En el Apéndice 2 se incluyen los procedimientos para el diseño de mezclas de estabilizaciones con cemento, emulsión asfáltica y asfalto espumado. En esencia, el trabajo para el diseño de mezclas consiste en:

PASO 1	<p><i>Selección inicial de los agentes estabilizadores, teniendo en cuenta:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Los costos relativos de los diferentes agentes estabilizadores. • Disponibilidad, en términos de obtener los volúmenes suficientes requeridos diariamente, y la consistencia en cuanto a la calidad de los agentes estabilizadores suministrados. • Si resultan apropiados para el tipo y la calidad del material por reciclar. La selección inicial del agente estabilizador más apropiado se basa en los resultados de los ensayos de laboratorio llevados a cabo durante la fase de investigación del pavimento. • Las propiedades requeridas en la mezcla reciclada, en relación con aquellas necesarias en el diseño del pavimento. <p>(Se debe hacer referencia al capítulo 5, en el cual se da más información sobre los “agentes estabilizadores”.) Basados en lo anterior, se toma una decisión sobre continuar los trabajos de diseño de las mezclas con un agente estabilizador o la combinación de ellos, tales como emulsión asfáltica y cemento.</p>
PASO 2	Las mezclas se preparan variando los contenidos del agente estabilizador e incorporando agua suficiente para lograr la cantidad óptima de fluidos de compactación. Generalmente se fabrican como mínimo cuatro mezclas, cada una de ellas con un contenido diferente de estabilizador.
PASO 3	Las probetas se elaboran usando métodos de compactación estandarizados.
PASO 4	Curado de las probetas.
PASO 5	Una vez que las probetas se hayan curado, se someten a diferentes ensayos para obtener sus propiedades y evaluar su susceptibilidad al agua.

Los resultados de estos ensayos se presentan en una gráfica: propiedad - contenido de agente estabilizador, con el objeto de definir aquel contenido que optimice las propiedades deseadas.

3.6 Enfoques para el diseño de pavimentos

A través de los años los métodos de diseño de pavimentos han evolucionado desde los empíricos relativamente simples hasta los de modelación más complejos que requieren programas sofisticados de computador. En las siguientes secciones se revisan brevemente los métodos que pueden aplicarse para el diseño de pavimentos cuando se contempla el reciclaje en frío.

En la tabla 3.2 se resumen diferentes métodos de diseño de pavimentos, organizados de menor a mayor complejidad y nivel de confianza con que se pueden utilizar los resultados.

	Métodos de diseño	Ensayos / Análisis	Investigaciones requeridas
	Basados en el CBR	Ensayo de CBR	Ensayos de laboratorio
	Basados en el Penetrómetro Dinámico de Cono (DCP)	CBR / Resistencia a la compresión inconfiada / Módulo E	Pruebas con el DCP
	Basados en las medidas de deflexión: <ul style="list-style-type: none"> • Deflexión de la superficie • Cuenca de deflexiones 	Deflexión	Medidas de deflexiones de la superficie y de la cuenca de deflexiones
	Métodos de diseño racionales o mecanísticos	Módulo E / Relación de Poisson / Espesor de las capas	DCP Cuenca de deflexiones Ensayos de laboratorio

En esta sección se revisan brevemente el alcance y la aplicabilidad de estos métodos. Sin embargo, para mayor profundidad puede consultarse la lista de referencias al final del capítulo 5.

3.6.1 Métodos de diseño basados en el CBR

Los métodos de diseño basados en el CBR son empíricos y se fundamentan en los valores del CBR saturado de los materiales del pavimento. En el método se asume que cada capa actúa de manera independiente en la estructura del pavimento. Los métodos típicos los han desarrollado el Asphalt Institute y el Transportation Road Research Laboratory (TRRL).

En razón de que el método tiene un fundamento empírico, debe usarse solamente como una guía y verificar el diseño con otros métodos.

3.6.2 Método de diseño basado en el Penetrómetro Dinámico de Cono

El método de diseño basado en el Penetrómetro Dinámico de Cono (DCP) se desarrolló con el objeto de permitir una evaluación detallada de la estructura del pavimento. Debido a que es un método con base empírica, se recomienda usarlo junto con otros métodos de diseño.

El DCP puede emplearse para:

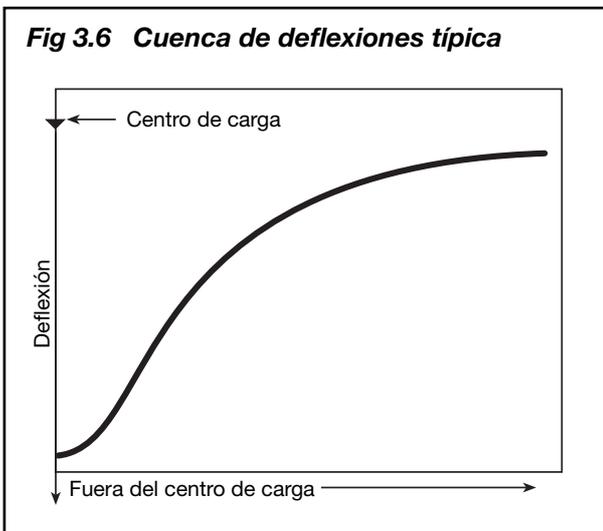
- Estimar el CBR in situ de materiales granulares y de suelos, así como la resistencia a la compresión inconfiada de capas ligeramente cementadas;
- Determinar el perfil de resistencia del pavimento existente;
- Establecer el balance de resistencia entre las capas del pavimento;
- Valorar la capacidad estructural del pavimento existente;

- Diseñar el refuerzo del pavimento; y
- Estimar el módulo elástico de los materiales in situ. Este módulo puede emplearse para los análisis por métodos racionales de la estructura del pavimento.

3.6.3 Métodos basados en las deflexiones

Los métodos de diseño de la rehabilitación basados en las deflexiones se enfocan en el análisis de la respuesta a la carga en donde se mide la máxima deflexión de la superficie bajo una carga aplicada y luego ésta se correlaciona con los parámetros de comportamiento del pavimento. Se emplean dos métodos fundamentados en la deflexión: los que tienen en cuenta las medidas de la deflexión de la superficie y los que utilizan las medidas de la cuenca de deflexiones.

Cuando un pavimento se somete a la carga de una rueda, éste sufre una deformación conocida como la cuenca de deflexiones, la cual puede usarse en un procedimiento conocido como retroanálisis para estimar el módulo elástico de cada capa del pavimento. En este procedimiento, en el que normalmente se emplean programas de computador tales como MODULUS, ELOMOD, o BOWLER, se calculan deflexiones teóricas bajo la carga aplicada usando un valor asumido del módulo para cada capa. Las deflexiones teóricas se comparan con las deflexiones medidas en la cuenca, y luego el módulo asumido se ajusta en un proceso iterativo hasta que las deflexiones teóricas y las medidas sean iguales. Puede aceptarse que los módulos así derivados son similares a los de las capas del pavimento y estos valores pueden utilizarse, junto con los espesores de las capas del pavimento, en los análisis por métodos racionales. En la figura 3.6 se muestra una cuenca de deflexiones típica.



Entre los métodos que se basan en las medidas de la deflexión de la superficie se encuentran los del Asphalt Institute y los del TRRL. El método desarrollado por el Asphalt Institute se fundamenta en la relación existente entre la Deflexión Elástica Representativa (RRD) y las repeticiones de las cargas de tráfico, mientras que el método del TRRL se basa en la relación entre la deflexión estándar y el tráfico acumulado. En ambos se toma el ahuellamiento de 10 mm como la condición crítica del pavimento.

Estos métodos de diseño se fundan en las medidas realizadas sobre pavimentos, en los cuales la principal causa del deterioro es la mala calidad de la subrasante; por tanto, solamente pueden usarse con confianza en aquellos pavimentos en los cuales su falla se atribuye a una subrasante débil, más que a la debilidad de las capas del pavimento.

3.6.4 Métodos racionales de diseño

Existe una clara tendencia a emplear los métodos racionales de diseño de pavimentos, los cuales se basan en los principios fundamentales de la ingeniería; por lo general arrojan un mayor nivel de confianza, comparados con los métodos derivados empíricamente.

El método de diseño más usado es el elástico-lineal para capas múltiples, aunque también se encuentran disponibles otros enfoques de diseño como los análisis elásticos-no lineales y los análisis elasto-plásticos.

En los métodos racionales de diseño se emplean programas de computador como el ELSYM5, CHEV, WELSEA, CIRCLY y el NSTRESS para determinar la respuesta del pavimento, en términos de las deflexiones, esfuerzos y deformaciones en cada capa del pavimento. Como datos de entrada, el método requiere los espesores y las propiedades de los materiales (módulo elástico y relación de Poisson) de las diferentes capas del pavimento. Los programas calculan la respuesta a la carga de diseño de cada capa en términos de la deflexión, esfuerzo y deformación. Estos valores se usan junto con las funciones de transferencia para calcular la capacidad estructural del pavimento.

Los métodos racionales tienen claras ventajas para el diseño de una rehabilitación, ya que permiten modelar el pavimento fallado e identificar zonas de debilidad. Con el uso de estos métodos pueden modelarse diferentes opciones de rehabilitación para reforzar el pavimento.

3.6.5 Resumen de los enfoques para el diseño de pavimentos

Las fases de investigación y diseño tienden a traslaparse, siendo el primer objetivo entender el comportamiento del pavimento y, el segundo, diseñar la rehabilitación más económica, teniendo en cuenta las expectativas del propietario de la carretera referentes al período de diseño, las propiedades de funcionalidad y los costos de mantenimiento.

El diseño por métodos racionales se prefiere como un medio para verificar la capacidad del pavimento existente e identificar zonas de debilidad, al igual que para efectuar el diseño de la rehabilitación. Se pueden usar otros métodos para verificar el diseño así obtenido.

3.7 Estructuras típicas de pavimentos reciclados en frío

3.7.1 Generalidades

En la tabla 3.5 se muestran diseños de estructuras típicas de pavimentos, que incluyen capas recicladas tratadas con cemento y ligantes asfálticos. En este catálogo se cubren cinco categorías de tráfico, variando desde tráfico liviano hasta muy pesado.

Se hace énfasis en que las estructuras mostradas en este catálogo deben tomarse solamente como indicativas de los diseños que resultan adecuados para las diferentes clases de tráfico. En estos ejemplos se han asumido las propiedades típicas de los materiales de las capas recicladas y se ha tomado una subrasante uniforme con rigidez superior a 100 MPa (aproximadamente un CBR de ~ 10). Se ha empleado una carga por eje de 80 kN.

Debe entenderse que cada proyecto de rehabilitación es único en términos de tipo, espesores y calidad de los materiales en las capas del pavimento existente y en la subrasante. Por tanto, es necesario llevar a cabo los trabajos de investigación y diseño recomendados en este manual para evaluar apropiadamente el pavimento y lograr el diseño más adecuado del mismo. Sin embargo, los diseños de este catálogo pueden utilizarse como una guía para discusiones preliminares y comparaciones de costos.

3.7.2 Ejemplo de selección del diseño del pavimento

La selección de la estructura apropiada del pavimento puede desarrollarse estimando primero el tráfico de diseño a partir de la tabla 3.4. De la tabla 3.3 se selecciona la clasificación del tráfico.

Finalmente, de la tabla 3.5 pueden tomarse las alternativas de las capas recicladas tratadas, ya sea con cemento o asfalto.

Ejemplo

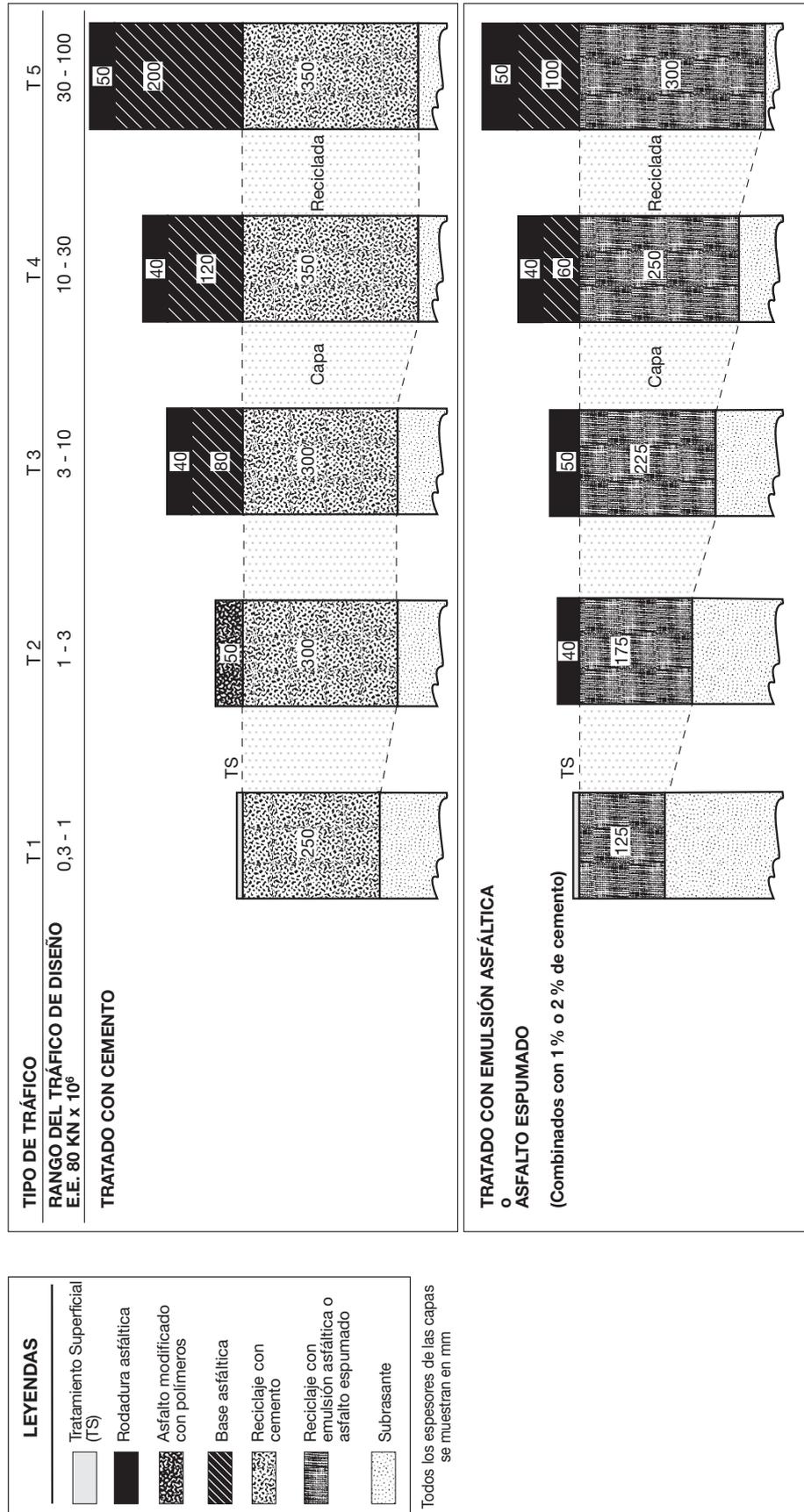
Información del tráfico:

Período de diseño (años)	10
Número de vehículos pesados por día	3000
Número de E.E. de 80 kN por vehículo pesado	2
Tasa de crecimiento del tráfico (% , compuesto)	4

Clasificación	Tráfico de diseño 80 kN x 10⁶
T1	0.3 a 1
T2	1 a 3
T3	3 a 10
T4	10 a 30
T5	30 a 100

En la tabla 3.4 se lee que el tráfico de diseño es de $27,35 \times 10^6$ E.E.. Por tanto, puede usarse como guía preliminar una estructura de pavimento en la clasificación de tráfico T4, en cuanto a la profundidad del reciclaje y los espesores de las capas asfálticas que se requerirán para alcanzar los requerimientos del diseño.

Tabla 3.5 Catálogo de Estructuras típicas de pavimentos reciclados



LEYENDAS

- Tratamiento Superficial (TS)
- Rodadura asfáltica
- Asfalto modificado con polímeros
- Base asfáltica
- Reciclaje con cemento
- Reciclaje con emulsión asfáltica o asfalto espumado
- Subrasante

Todos los espesores de las capas se muestran en mm

NOTA: Los diseños de los pavimentos típicos para las diferentes categorías de tráfico están basados en una capacidad portante de la subrasante con CBR > 10 (Módulo elástico > 100 MPa)

Capítulo 4: Aspectos prácticos y de funcionalidad

4.1 Generalidades

En el capítulo anterior se habló sobre los métodos y procedimientos que se utilizan con frecuencia en la determinación de las opciones disponibles para rehabilitar pavimentos deteriorados, y sobre la viabilidad de cualquier alternativa de reciclaje. Cuando el reciclaje surge como la opción preferida, el siguiente reto es llevar a cabo el trabajo. En este capítulo se trata de manera más detallada la operación real del reciclaje, enfocándose en algunos de los aspectos más importantes que hacen un proyecto exitoso.

Desde la perspectiva de la construcción, los procedimientos de diseño proveen una definición clara de los dos requisitos más importantes para el reciclaje:

- **Las especificaciones de calidad de los materiales en la totalidad de la capa reciclada; y**
- **El espesor de la capa reciclada.**

Evidentemente, el desempeño del pavimento rehabilitado depende del cumplimiento de estos dos requisitos básicos; ellos representan suposiciones fundamentales que se hacen para predecir la vida del pavimento rehabilitado, y cualquier omisión o error en éstas puede dar como resultado una falla prematura.

Debido a la inmediatez de este tipo de trabajos, los proyectos de reciclaje necesitan un manejo apropiado. Las máquinas modernas de reciclaje tienen un gran potencial en cuanto a su rendimiento, por lo que no es extraño que una sola máquina realice un kilómetro completo de vía rehabilitada en un día, aunque para efectos de planeación se utiliza normalmente un estimativo más conservador de 5000 m². Para obtener el máximo beneficio de este potencial, las operaciones de reciclaje deben manejarse con cuidado para asegurar que lo que se obtiene cumpla con los requerimientos especificados, supervisando que:

- Todos los aspectos del trabajo se analicen en detalle y se planeen meticulosamente;
- Los obstáculos al tren de reciclaje se identifiquen y remuevan a tiempo;
- La demanda de materiales (como los agentes estabilizadores) se satisfaga continuamente, y que éstos estén disponibles en el sitio de la obra a tiempo;
- La disponibilidad de la maquinaria esté garantizada mediante programas apropiados de mantenimiento preventivo;
- Los operarios y los supervisores estén entrenados adecuadamente y entiendan con claridad las diferentes facetas de la operación de reciclaje; y
- Los asuntos de seguridad industrial reciban la atención que se merecen, particularmente cuando se trabaja en caliente con agentes estabilizadores de tipo bituminoso.

En las secciones siguientes se profundiza en estos aspectos y se enfatiza en los temas vitales para crear un ambiente laboral productivo en las operaciones de reciclaje. Aunque se mencionan los agentes estabilizadores, éstos se discuten ampliamente en el próximo capítulo, ya que se consideran uno de los asuntos más importantes del trabajo de reciclaje.

4.2 Planeación para el reciclaje

El éxito en el desarrollo de un proyecto de reciclaje, como en todas las operaciones de alto volumen y gran complejidad, depende de la calidad en la planeación. Antes de comenzar los trabajos, hay que analizar con cuidado cada uno de los pasos y operaciones que deben ejecutarse y, diariamente, o para cada turno, pasar este proceso al papel en forma de un plan de producción. En particular, deben considerarse los siguientes aspectos básicos:

Tipo de máquina recicladora. La decisión de usar una 2200 CR o una WR 2500 en un proyecto en particular es importante. El tipo de máquina utilizada afecta la tasa de producción y establece el ancho y la profundidad, máximos de corte que pueden reciclarse por pasada. Con la 2200 CR queda eliminada la necesidad de una motoniveladora, debido a la regla montada en la máquina sobre orugas.

Geometría de la vía. El ancho de la vía es primordial, ya que determina el número de pasadas (cortes) requeridas para cubrir totalmente la calzada. Las secciones de anchos variables al principio y al final de carriles en subida requieren atención especial. Además, la forma de la superficie (bombeo o peralte) impone la ubicación de las juntas longitudinales entre cortes adyacentes.

Acomodación del tráfico. El tráfico que utiliza la vía existente, su composición en términos de vehículos livianos y pesados, y la cantidad que pasará mientras se recicla, a menudo determinan cómo se va a ejecutar el trabajo. Generalmente se prescriben limitaciones en las horas de trabajo, así como también las necesidades para el acceso temporal de las personas a sus propiedades.

Objetivo de producción. La cantidad de trabajo reciclado durante el período planeado debe ajustarse lógicamente a la vía. Por lo general, el trabajo se programa para completar una sección de la vía, ya sea a lo ancho o sólo en la mitad de éste. Reciclar una porción de la vía no es práctico; por ejemplo, reciclar sólo un corte a lo largo de la línea central en una carretera que requiere tres cortes para completar la mitad de su ancho. Cuando medias calzadas recicladas parcialmente son abiertas al tráfico, se ocasionan problemas en el momento de realizar las juntas, y además se causa confusión a los usuarios, especialmente de noche.

Requisitos del producto terminado. Además del espesor de la capa, los requerimientos precisos en función del producto terminado deben estar claros. Éstos incluyen detalles de los niveles y tolerancias de las formas finales, objetivos de compactación, consideraciones de la textura superficial y manejo de cualquier material sobrante.

Material en el pavimento existente. El tipo de material en el pavimento existente, su consistencia y su contenido de humedad son todos pertinentes. Los cambios en los espesores de los diferentes materiales que forman el pavimento existente (particularmente de las capas asfálticas) podrían tener una influencia significativa en la velocidad de avance de la máquina recicladora. Estas diferencias podrían también requerir cambios en la tasa de aplicación de los agentes estabilizadores, del agua e incluso en los espesores de reciclaje.

Comportamiento del material reciclado. La forma como el material se comporta cuando es reciclado influye en cómo debe extenderse, compactarse y terminarse. Cualquier restricción de tiempo en el extendido y la compactación, que normalmente se presenta cuando se utilizan agentes estabilizadores cementantes, tendrá influencia sobre cómo debe ejecutarse el trabajo.

Requisitos de pre-reciclado. Éstos incluyen:

- Remoción de obstrucciones, como tapas de alcantarillas;
- Instalación de nuevos sumideros o de cualquier otro tipo de drenaje adicional;
- Fresado para alcanzar la textura o el nivel prescrito de la superficie; y
- Transporte y colocación de nuevos materiales sobre la superficie existente de la vía.

Requerimientos específicos antes de la apertura al tráfico. Algunos proyectos requieren que la superficie de la capa terminada reciba algún tratamiento especial, como por ejemplo el riego de una emulsión asfáltica diluida. El tiempo necesario para completar estas actividades debe tenerse en cuenta en la programación diaria.

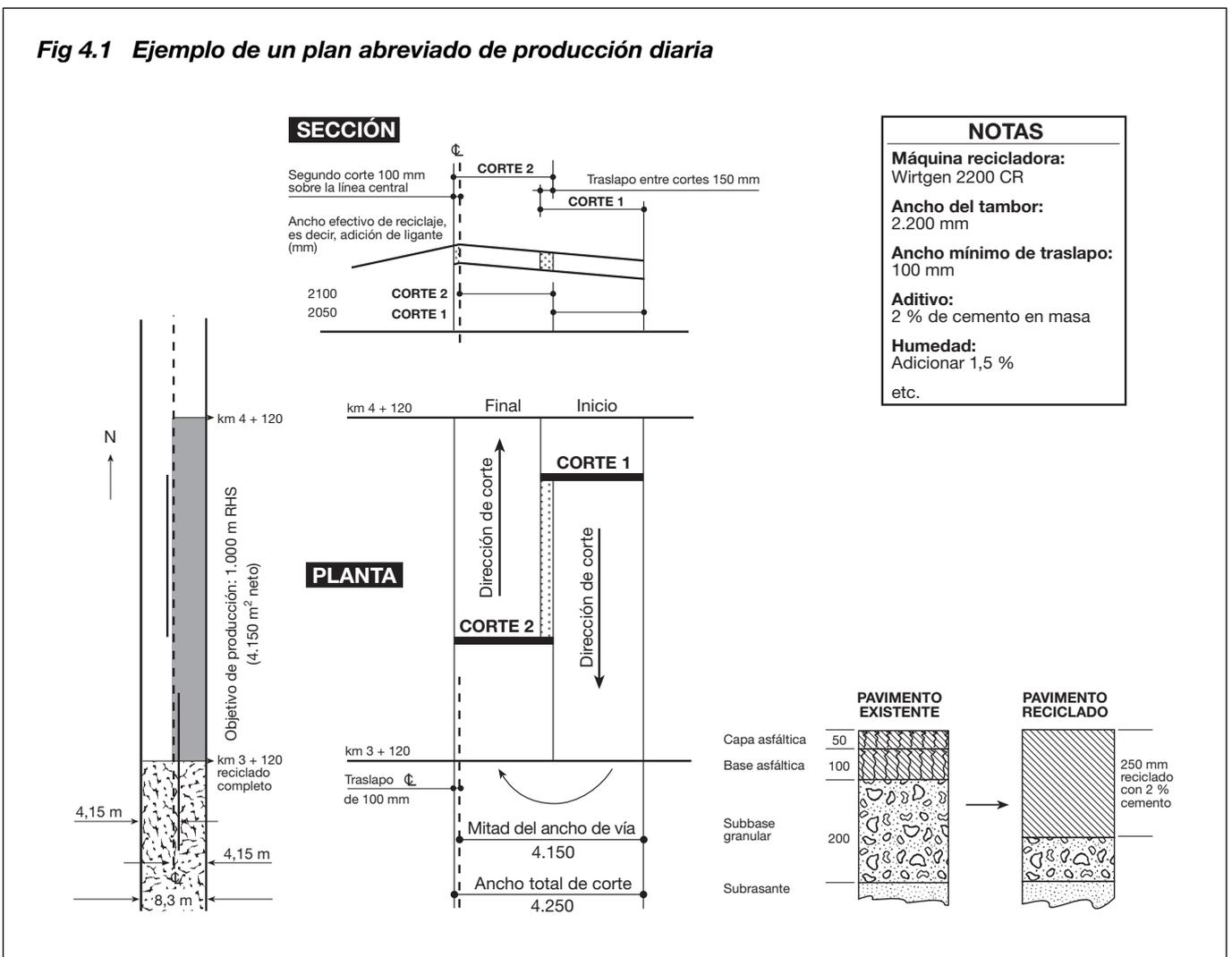
Estos aspectos han de considerarse en un plan de producción que sea simple y fácil de leer, como el mostrado en la figura 4.1, el cual es un ejemplo abreviado para ilustrar el tipo de programación que debe preceder al reciclaje.

Así mismo, tiene que diseñarse un plan más detallado para abarcar todos los aspectos discutidos en las siguientes secciones de este capítulo, acompañado con detalles de los agentes estabilizadores. Los planes diarios de producción deben dar rápidamente la siguiente información básica:

- La secuencia general de reciclaje dibujada en un esquema, el número de cortes requeridos para cubrir el ancho de la vía (o la mitad de la calzada), detalles del ancho del traslazo para cada junta longitudinal y el ancho efectivo de reciclaje por corte;
- La secuencia de corte, dirección de avance y longitud que hay que reciclar antes de dar reversa (o giro) para empezar el nuevo corte. Al final de cada corte debe incluirse una flecha que indique dónde será el nuevo corte, tanto adyacente como a lo largo de la vía. También será útil tener los tiempos estimados para cada operación.
- El volumen (o masa) de todo agregado importado, agentes estabilizadores y agua requeridos para el trabajo del día, separado por secciones o cortes de manera lógica; y
- Cualquier obstrucción conocida, con los detalles para su remoción o tratamiento.

Debe incluirse un esquema que muestre una sección de la estructura existente del pavimento, resaltando claramente la profundidad por reciclar.

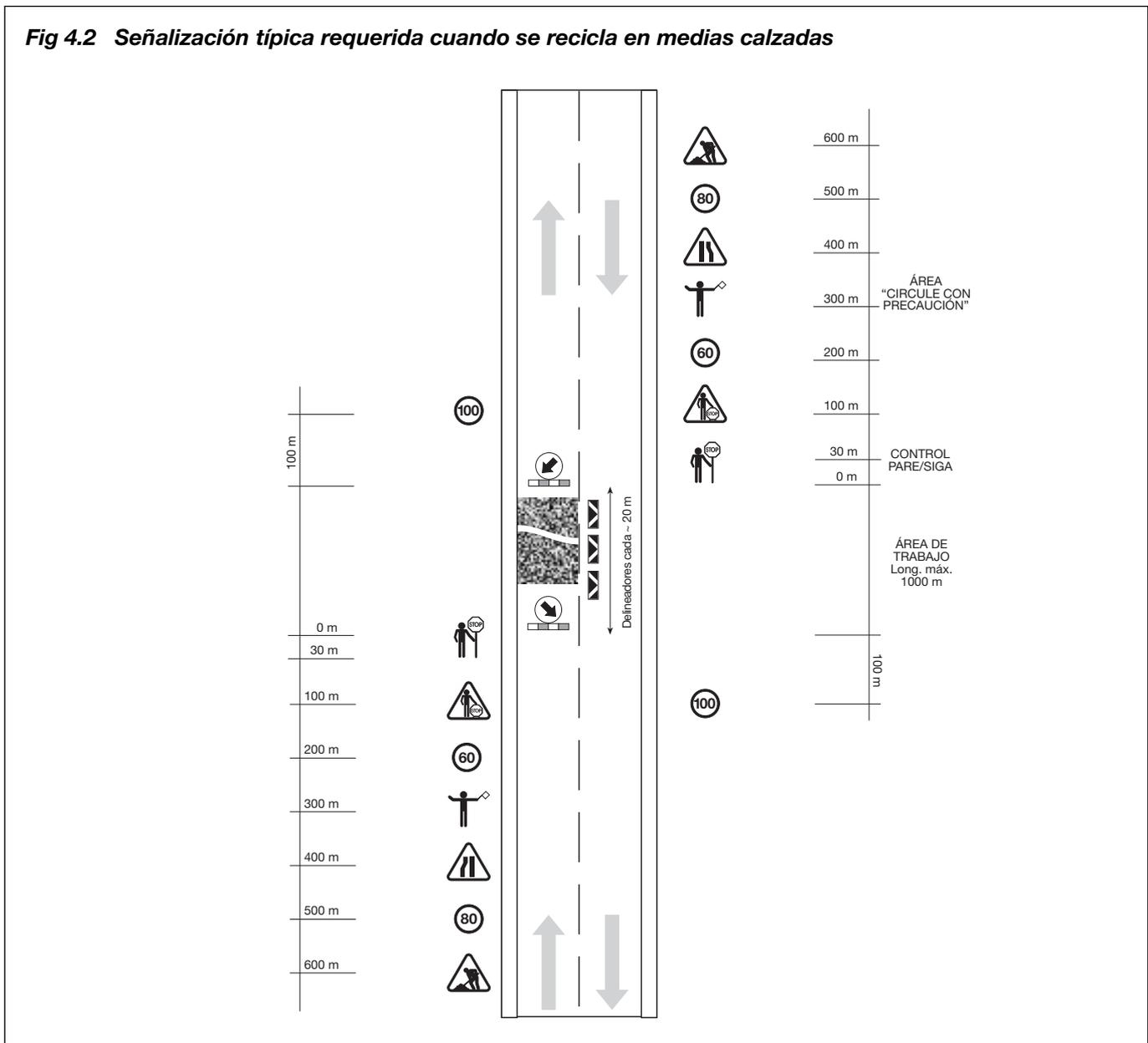
Fig 4.1 Ejemplo de un plan abreviado de producción diaria



4.3 Acomodación del tráfico público

Al comparar con otros procesos de rehabilitación a profundidad total como la excavación y el remplazo de capas ya falladas, el reciclaje en frío tiene un impacto relativamente bajo sobre la seguridad del público que pasa por la vía. Debido a que el proceso se realiza en una sola pasada y a las altas tasas de producción, es posible que sólo una porción de la vía esté cerrada a la vez (normalmente el ancho de un carril). Con la planeación cuidadosa de los trabajos, el público puede disfrutar sin problemas por lo menos de la mitad de la calzada, permitiendo controlar el tráfico utilizando señales sencillas de pare o luces para tal efecto.

Debe cumplirse con los requisitos legales acerca de la disposición de avisos temporales de alerta a ambos lados de la sección de vía que se está reciclando, así como colocar conos grandes o delineadores cada 20 m a lo largo de la vía, demarcando la sección cerrada al tráfico. El control deficiente del tráfico puede tener como consecuencia mayores retardos de la obra (por ejemplo, vehículos que bloquean la trayectoria de la recicladora) y causar incluso interrupciones en el plan de trabajo si ocurre una colisión. Cuando estos problemas se presentan puede afirmarse casi invariablemente que su causa fue un control pobre en el tráfico. En la Figura 4.2 se muestra un ejemplo de la distribución típica de los requisitos de señalización para un proyecto de reciclado.



4.4 Logística

El reciclado en frío es un proceso rápido, que implica tasas de producción elevadas y que las máquinas estén alimentadas continuamente con agentes estabilizadores, agua y agregados importados (donde éstos se requieran) para alcanzar este alto rendimiento. Esta situación presenta un reto en la procura de los diferentes materiales, en especial cuando las líneas de suministro son largas o el acceso al sitio es restringido.

La demanda diaria de todos los requerimientos importados ha de calcularse con anticipación, y programar las órdenes y sus envíos de manera tal que se asegure que el proceso de reciclado estará continuamente alimentado, pues sin los suministros necesarios la producción estará restringida y será imposible alcanzar el potencial completo de rendimiento. Estimar los requerimientos de materiales importados, agentes estabilizadores y agua, requiere proyectar los cálculos con base en los objetivos de la producción diaria, como se demuestra en los siguientes ejemplos.

- **Material importado.** Asuma que una capa uniforme de grava natural, de 50 mm de espesor, se extenderá sobre la superficie existente de la vía antes del reciclaje. La demanda diaria de material importado será:

1 Objetivo diario de producción	5 000,0	m ²
2 Espesor suelto requerido de la capa de grava natural	50,0	mm
3 Volumen por importar de grava natural suelta (Ítem 1 x $\frac{\text{Ítem 2}}{1000}$)	250,0	m ³
4 Densidad de la grava extendida sobre la vía	1 800,0	kg/m ³
5 Toneladas de material por importar (Ítem 3 x $\frac{\text{Ítem 4}}{1000}$)	450,0	t

- **Agentes estabilizadores.** Asuma que las especificaciones del proyecto exigen la adición de 1,5 % de cemento y 3 % de asfalto espumado (en peso). La demanda diaria de agentes estabilizadores es:

1 Objetivo diario de producción	5 000,0	m ²
2 Espesor de la capa reciclada	250,0	mm
3 Densidad del material reciclado compactado	2 250,0	kg/m ³
Demanda de cemento		
4 Adición especificada de cemento	1,5	%
5 Toneladas de cemento requeridas (Ítem 1 x $\frac{\text{Ítem 2}}{1000}$ x $\frac{\text{Ítem 3}}{1000}$ x $\frac{\text{Ítem 4}}{100}$)	42,2	t
Demanda de asfalto		
6 Adición especificada de asfalto espumado	3,0	%
7 Toneladas de asfalto requeridas (Ítem 1 x $\frac{\text{Ítem 2}}{1000}$ x $\frac{\text{Ítem 3}}{1000}$ x $\frac{\text{Ítem 6}}{100}$)	84,4	t

• **Adición de agua para alcanzar el contenido óptimo de humedad**

1 Objetivo diario de producción	5 000,0	m ²
2 Espesor de la capa reciclada	200,0	mm
3 Densidad del material reciclado compactado	2 250,0	kg/m ³
4 Contenido óptimo de humedad del material reciclado	7,5	%
5 Contenido de humedad promedio en el sitio, antes del reciclaje	4,0	%
6 Agua que hay que adicionar para alcanzar la humedad óptima (Ítem 4 - Ítem 5)	3,5	%
7 Cantidad total de agua requerida (redondeada) (Ítem 1 x $\frac{\text{Ítem 2}}{1000}$ x Ítem 3 x $\frac{\text{Ítem 6}}{100}$)	78 750,0	litros

La demanda de agua calculada en el ejemplo anterior es la necesaria para alcanzar el contenido óptimo de humedad del material reciclado. La cantidad de agua se agrega al material durante el proceso de reciclado por inyección dentro de la cámara de mezclado de la máquina y no se incluye ninguna provisión requerida para aplicar sobre la superficie reciclada con propósitos de terminado o curado. Para esta situación deben realizarse provisiones adicionales.

En grandes proyectos de reciclaje, o donde las líneas de suministro son largas, algunas veces se instalan sistemas de almacenamiento temporal para evitar retrasos en la obra debidos a demora en los suministros. Por lo regular, estas instalaciones han de tener la capacidad de almacenar por lo menos un día de demanda de cada material. Para el cemento generalmente se instalan silos; para productos empacados, contenedores y para los líquidos, tanques. En teoría, estas instalaciones deben llenarse y utilizarse únicamente cuando se presenta escasez, evitando así manejos dobles. En todo caso, en la práctica es preferible incorporar algunos de ellos dentro del sistema para evitar problemas adicionales de logística. Ejemplos de estos problemas son:

- El asfalto caliente (>160°C), almacenado en un tanque bien aislado, perderá temperatura a una tasa de aproximadamente 1°C por hora. Éste debe mantenerse caliente si se pretende usarlo en el evento de que no lleguen suministros frescos. Sin embargo, esta práctica es costosa (valor del calentamiento) y perjudicial para el asfalto (su oxidación ocurre cuando se almacena por largos períodos a altas temperaturas).
- No todas las emulsiones asfálticas son estables por largos períodos. El fabricante debe dar instrucciones especiales de almacenamiento de dichas emulsiones para evitar que el asfalto se separe del agua mientras está almacenado.
- El cemento debe utilizarse máximo tres meses después de su elaboración, ya que éste pierde resistencia con el tiempo. Además, los silos o los contenedores tienen que estar sellados para evitar el ingreso de agua lluvia o para prevenir pérdidas.

Todos estos factores deben considerarse en detalle cuando se planea la logística de un proyecto de reciclaje. Como se describió con anterioridad, los cálculos para determinar la demanda diaria son relativamente simples y tienen que elaborarse meticulosamente para lograr el alto potencial de producción del proceso de reciclaje.

4.5 Trabajos preliminares al reciclaje

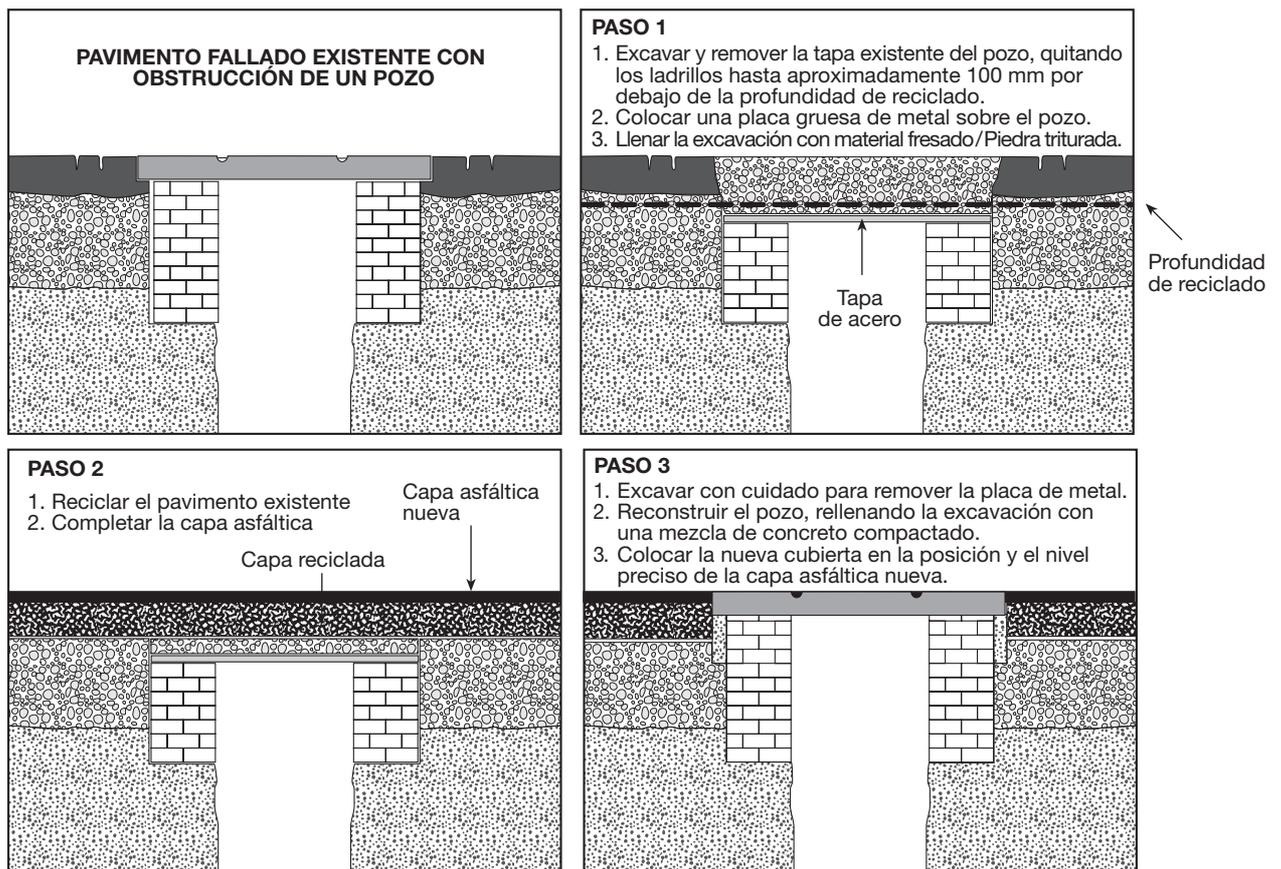
Los trabajos preliminares al reciclaje deben realizarse a tiempo para permitir que la recicladora trabaje sin interrupciones. Detener el tren de reciclaje no solo consume tiempo valioso sino que también genera discontinuidades en el producto terminado. Al igual que las discontinuidades en otras operaciones constructivas (como la pavimentación con asfaltos), se crean áreas potenciales de falla en el pavimento; por esta razón deben evitarse, siempre que sea posible.

En los proyectos de reciclaje frecuentemente se requieren cuatro tipos de trabajos preliminares. Cada uno es considerado por separado en las siguientes secciones.

4.5.1 Remoción de obstáculos

Al reciclar en calles urbanas se encuentran pozos de inspección y otras estructuras. Las tapas de los pozos deben removerse antes del reciclado, como se muestra en la Figura 4.3. Los beneficios de remover estas obstrucciones van más allá de permitir que la operación de reciclaje se realice sin interrupciones. La estructura resultante del pavimento es continua, tanto en espesor como en la consistencia del material, y puede construirse sin obstrucciones la capa asfáltica que usualmente se coloca sobre la capa reciclada. Una vez terminado el pavimento, la alcantarilla puede ponerse en la posición y en el nivel preciso sobre la nueva superficie, en donde, si se hubiera colocado una capa asfáltica sobre la estructura existente, habría resultado inevitablemente un desnivel.

Fig 4.3 Remoción de obstáculos antes del reciclaje



4.5.2 Conformación de la vía existente antes del reciclaje

Antes del reciclaje deben corregirse las superficies que están muy deterioradas, asegurando así que el espesor de la capa terminada sea uniforme (tanto transversal como longitudinalmente) luego de que se alcanzaron los niveles requeridos de la superficie con la motoniveladora, o con la terminadora. Esto resulta importante, en particular cuando la capa reciclada es relativamente delgada (<125 mm).

Las correcciones de la forma y de la sección transversal de la vía incluyen cambios en el bombeo (sobre elevación), así como ajustes menores a la pendiente general para atenuar irregularidades pronunciadas, tales como montículos y depresiones. Los fallos profundos y los ahuellamientos deben considerarse dentro de este tipo de irregularidades, pero los asentamientos mayores y las renivelaciones que superen el espesor de la capa reciclada tienen que corregirse importando material nuevo. La conformación preliminar de la superficie establece esencialmente su apariencia final, tanto transversal como longitudinalmente, antes del reciclado, asegurando así la integridad geométrica de la capa reciclada.

La conformación preliminar es relativamente fácil de alcanzar por uno o por la combinación de los siguientes métodos:

- Importando y extendiendo material sobre la superficie existente para lograr la forma requerida. Esto se trata en el parágrafo 4.5.3;
- Removiendo material de la superficie de la vía, normalmente sólo cuando hay profundidad suficiente de asfalto para permitir un fresado preliminar. Esto se trata en el parágrafo 4.5.4; y/o
- Repasando el material de las capas superficiales del pavimento existente, utilizando una motoniveladora, para obtener la superficie requerida. Por lo general, este método tan sólo se utiliza en vías no pavimentadas, donde es relativamente fácil desprender y retrabajar la capa existente, pero debe considerarse sólo donde hay una capa lo suficientemente gruesa de grava de buena calidad.

4.5.3 Importación de material nuevo

La importación y extendido de material nuevo sobre la superficie de la vía antes del reciclaje se realiza por las siguientes razones:

- Para corregir el mal estado de la superficie, se importa material de una calidad tal que le permita mezclarse con las capas superiores del pavimento existente; luego se extiende en la línea, al nivel requerido sobre la superficie de la vía, y se compacta ligeramente. Para evitar cuñas o lentes de material no tratado bajo la capa reciclada, es importante asegurar que el espesor del material importado no exceda la profundidad de reciclaje;
- Para mejorar la gradación del material reciclado. Cuando se reciclan capas asfálticas el material a menudo no tiene algunos tamaños de partículas que serían ideales para una gradación continua, especialmente la fracción fina (material que pasa el tamiz de 0,075 mm). Importar la fracción faltante y extenderla sobre la superficie de la vía mejora la gradación del producto reciclado. La decisión sobre cuáles fracciones deben añadirse se basa normalmente en las gradaciones de las muestras tomadas de la vía. Debe tenerse cuidado especial para asegurar que estas muestras sean representativas del material que se va a producir cuando se recicle; y
- Para aumentar el espesor de la capa reciclada sin afectar la estructura de soporte. Algunas veces el material de las capas superiores resulta insuficiente para garantizar el espesor requerido de la capa reciclada. Esto puede atribuirse a la mala calidad del material subyacente, o a la presencia de material inapropiado, como bases con partículas de gran tamaño. En estos casos, la importación de material permite que se alcance el espesor de diseño de la capa de pavimento.

4.5.4 Fresado preliminar al reciclaje

El fresado y la remoción del material fresado resultante se ejecutan usualmente para permitir que se mantengan los niveles existentes de la superficie después del reciclaje, eliminando así el costoso trabajo asociado con el ajuste de las elevaciones del drenaje y de la demás infraestructura existente. Por lo general, esto sólo ocurre cuando se trabaja en zonas urbanas.

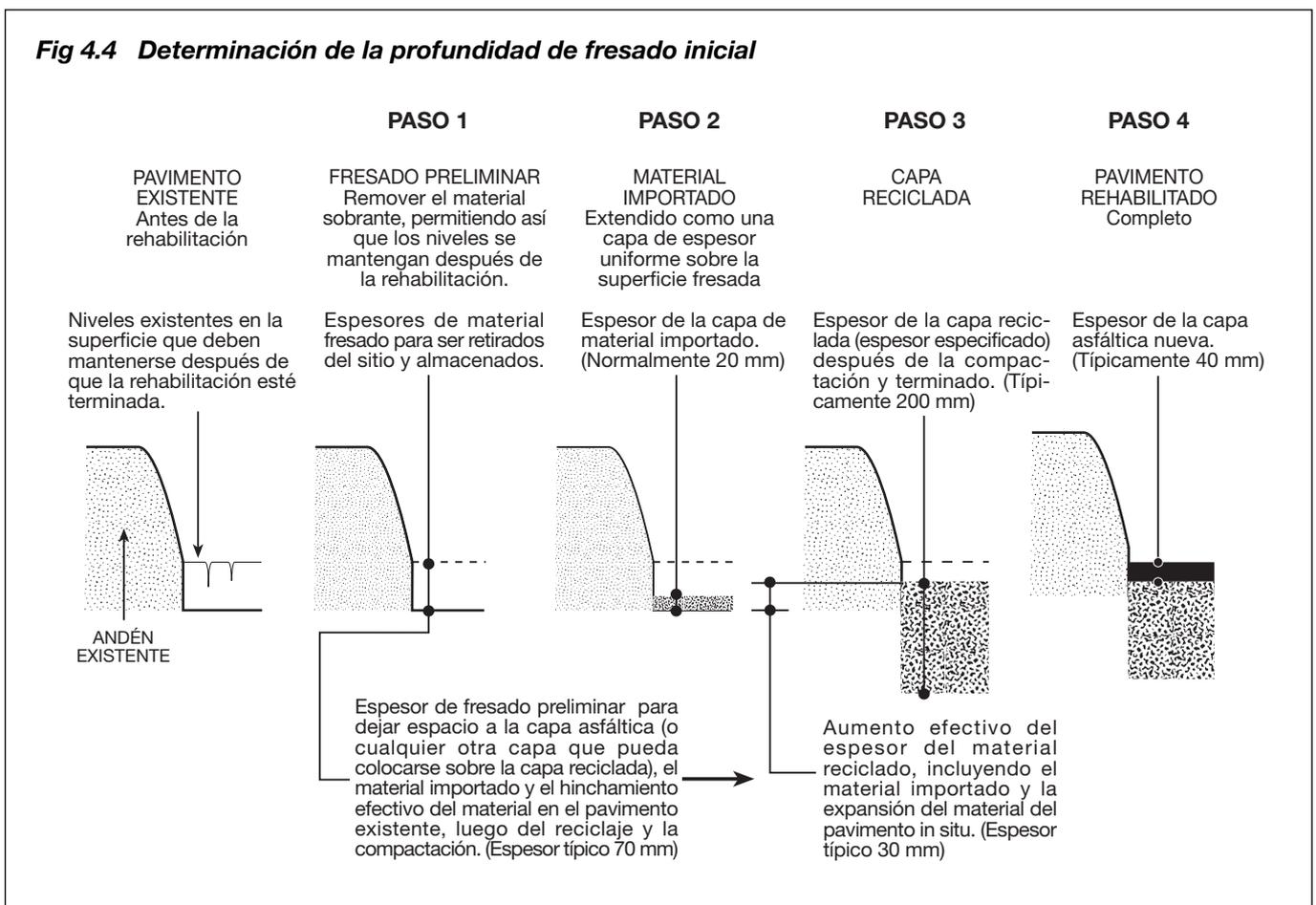
Como prerrequisito para un fresado preliminar, debe revisarse el pavimento con el fin de asegurar que la porción superficial puede removerse sin perjudicar la resistencia de la estructura; además ha de verificarse el material subyacente para asegurar que el espesor requerido de la capa reciclada pueda alcanzarse sin utilizar material subyacente de mala calidad.

Normalmente, el fresado preliminar se restringe a pavimentos con múltiples capas de asfalto, colocadas a lo largo de los años.

Cuando se estima la profundidad del material que se va a fresar, se deben considerar tres factores. Éstos se muestran en la Figura 4.4, y pueden resumirse así:

- El efecto que cualquier agregado importado tendrá en el espesor de la capa reciclada. Esto es relativamente simple de estimar cuando se agrega material granular. Sin embargo, cuando se usa material fino, éste tiende a ser absorbido dentro de los intersticios del material reciclado. No es raro que el polvo de trituración menor de 6,7 mm “desaparezca” dentro del material reciclado que contiene predominantemente asfalto, en especial cuando se adiciona menos del 15 % en volumen. En efecto, las partículas finas se pierden dentro de los vacíos del material granular reciclado, produciendo un cambio imperceptible en el volumen.
- El tipo de material en el pavimento existente influye sobre la cantidad de “grumos” que se forman cuando éste se recicla. Una mezcla asfáltica siempre se expande aproximadamente un 10 % cuando se recicla como una capa estabilizada, fenómeno producido por el aumento relativo en el contenido de vacíos entre la capa asfáltica y el material fresado estabilizado. En todo caso, dichas expansiones no suceden tan frecuentemente cuando se reciclan capas delgadas con emulsión asfáltica; y
- Los espesores de cualquier capa estructural adicional o de los tratamientos superficiales que van a construirse sobre la capa reciclada.

Fig 4.4 Determinación de la profundidad de fresado inicial



4.6 Juntas y traslapos

Cuando se recicla se encuentran dos tipos de juntas: longitudinales, que van paralelas a la línea central de la vía, y transversales, que van perpendiculares a esta línea. Todas las juntas son esencialmente discontinuidades en el pavimento y, a menos que se traten apropiadamente, tienen el potencial de afectar la integridad estructural de la capa reciclada. Las juntas longitudinales y transversales son muy diferentes, y por esta razón se consideran independientemente.

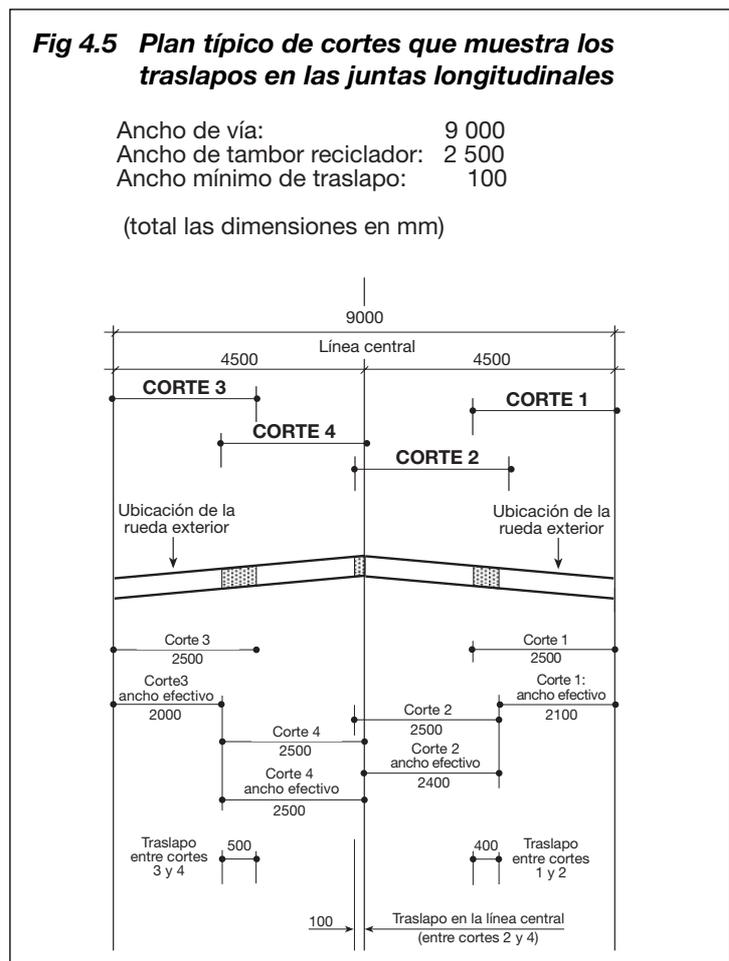
4.6.1 Juntas longitudinales

El ancho de corte de la recicladora normalmente es menor que el ancho de la vía. Para reciclar el ancho total se necesitan varias pasadas (o cortes), que producen una serie de juntas longitudinales, entre cortes adyacentes. Para garantizar la continuidad entre cortes adyacentes se requieren traslapos a lo largo de cada junta. Únicamente en el primer corte se reciclará material virgen en todo el ancho del tambor. Por este motivo, el ancho efectivo de los cortes subsecuentes se verá reducido en el ancho del traslapo; de todas maneras, los agentes estabilizadores deben aplicarse sólo sobre el ancho de corte que no resultará afectado por ningún traslapo futuro. De aquí que el último corte de la secuencia a través del ancho de la vía (o de la mitad del ancho) será el único que recibirá el agente estabilizador para el ancho completo del tambor. Esto impedirá volver a mezclar el material ya tratado en el ancho del traslapo.

El número de cortes necesarios para el reciclaje del ancho total de vía y la ubicación de cada junta longitudinal están regidos por:

- El tipo de máquina recicladora utilizada en el proyecto, en particular el ancho del tambor. Además, el lado derecho de las máquinas 2200 CR y WR 2500 está diseñado para cortar a ras contra la cara del andén o cualquier borde similar; generalmente se coloca contra la parte exterior del primer corte;
- El ancho mínimo de traslapo normalmente es de 100 mm, pero a veces se aumenta teniendo en cuenta el espesor de las capas (> 300 mm), lo grueso del material reciclado, el tipo de agente estabilizador y el lapso que transcurra entre la ejecución de cortes adyacentes. Generalmente el ancho del traslapo debe aumentar con el espesor de la capa, con el tamaño de los materiales, y cuando se trabaja con agentes estabilizadores cementantes donde el primer corte fue realizado más de doce horas antes de comenzar el corte adyacente;
- El ancho de vía que se va a reciclar y los detalles de la sección transversal. Las vías con bombeo deben tratarse preferiblemente por medias calzadas para lograr en la corona una profundidad uniforme de reciclaje; y
- Debe evitarse que la ubicación de las juntas longitudinales esté sobre la huella de los vehículos pesados que se desplazan lentamente.

Como se describió en la sección 4.2, la elaboración de un plan de cortes detallando cada traslapo es uno de los primeros requisitos cuando se planea un proyecto. El traslapo debe restarse del ancho del tambor para determinar el ancho efectivo de reciclaje para cada corte el cual, a su vez, gobierna la cantidad de agua y agente estabilizador que se va a utilizar, como se muestra en la Figura 4.5.



El traslape apropiado de juntas es un factor importante en el desempeño final de la capa reciclada. Como se dijo anteriormente, las juntas son discontinuidades en la estructura del pavimento y por esta razón se les debe prestar la atención que merecen. Cuando se presentan problemas, éstos se deben generalmente a la operación inapropiada de la recicladora, generando franjas no recicladas entre cortes adyacentes. Para ayudar al operario a conducir correctamente la recicladora, deben establecerse guías claras con marcas de pintura sobre la superficie existente, o tender una cuerda que forme una línea fácilmente visible. Por lo general, sólo los primeros cortes necesitan demarcación, ya que de ahí en adelante se sigue la línea del corte anterior. En todo caso, antes de comenzar un nuevo corte, es importante revisar que la línea guía se note claramente sobre la longitud total del corte.

4.6.2 Juntas longitudinales en vías angostas

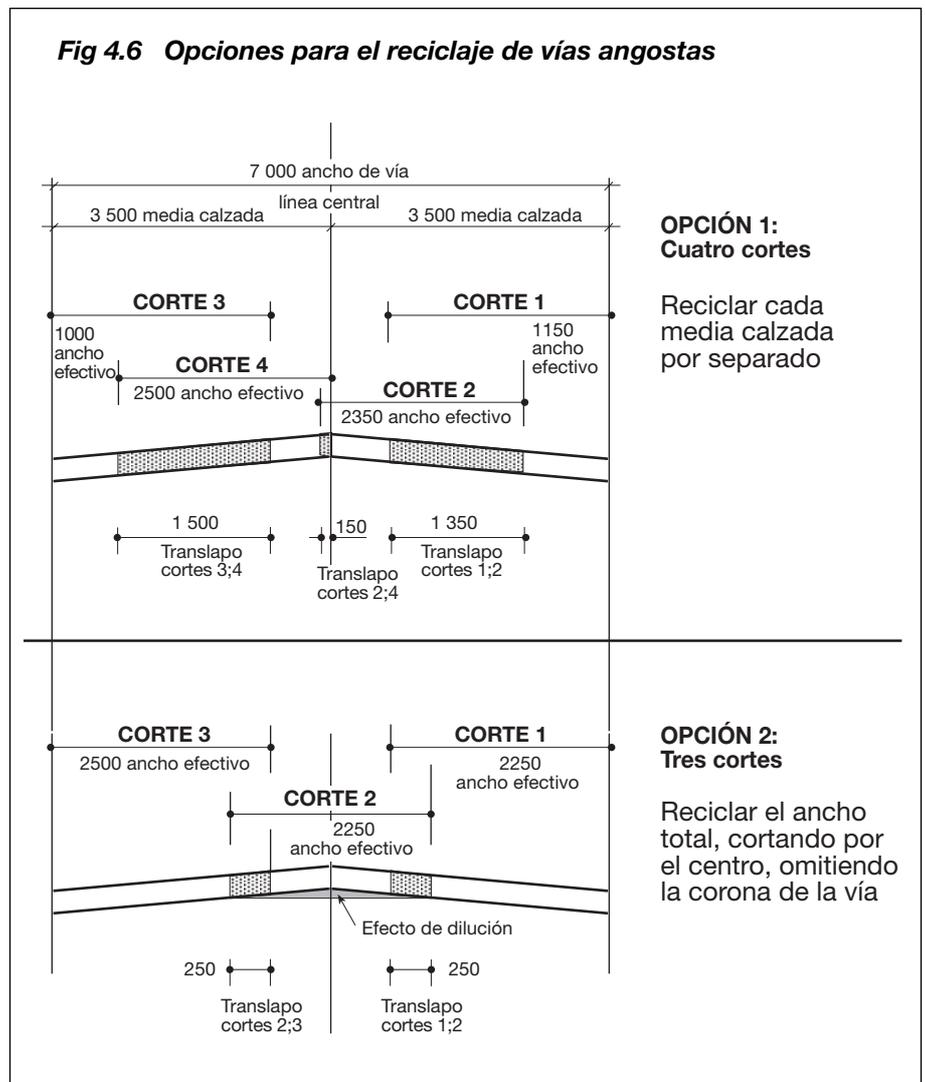
En vías angostas (ancho < 7 m), debe considerarse la posibilidad de trabajar su ancho completo en lugar de la mitad. Cuando se utiliza una WR 2500 con un tambor estándar de 2,5 m de ancho, se requerirán dos cortes con un traslape grande para reciclar cada mitad de la calzada, necesitándose cuatro cortes para completar el ancho total de vía. Sin embargo, si se considera esto último, sólo se requerirán tres cortes con traslapos mucho más pequeños, haciendo la operación un 25 % más eficiente. Esta comparación se muestra en la Figura 4.6.

La decisión por la opción preferida se registrará por:

- la composición (% de vehículos pesados) y el volumen del tráfico que utiliza la vía, lo cual indicará los requerimientos mínimos para su acomodación. Por lo general, las vías angostas tienen bajos volúmenes de tráfico, relativamente liviano, que puede acomodarse en vías alternas;

- se experimentará un efecto de dilución de los agentes estabilizadores a lo largo de la corona en la mitad del corte central. Este efecto aumenta significativamente a medida que el espesor de reciclaje disminuye. Por ejemplo, si se utiliza una WR 2500 con tambor de 2,5 m de ancho, en un proyecto en el que la profundidad de reciclaje es de 200 mm y el bombeo es del 2 %, la dilución será superior al 10 %. Esto excederá muchos de los límites especificados, pero puede corregirse aumentando parcialmente la tasa de aplicación y reduciendo la profundidad del corte (eso sí, siempre manteniéndose dentro de los límites de tolerancia); y

- después del reciclaje, deberá establecerse la corona. Esta es una operación relativamente simple cuando se utiliza una máquina 2200 CR, ya que la plancha puede ajustarse para obtener el bombeo requerido. Cuando se trabaja con una WR 2500, debe emplearse una motoniveladora para cortar hasta los niveles finales.



4.6.3 Juntas transversales

Las juntas transversales son discontinuidades a través del ancho de corte y se forman cada vez que la operación de reciclaje empieza o se detiene. Cada parada, incluso las que sólo toman unos minutos para cambiar los carrotanques, crea una junta que es esencialmente un cambio en la uniformidad del material reciclado. Se debe entonces intentar minimizar las paradas, y donde éstas sean inevitables, tratar cuidadosamente la junta resultante.

La clave para tratar apropiadamente estas juntas es entender qué sucede dentro de la cámara de mezclado de la recicladora, en particular en el proceso de adición de los agentes estabilizadores. Muchos problemas resultan del exceso o defecto en la aplicación de los agentes estabilizadores o del agua en la junta. Dos de los aspectos más importantes en cuanto a las juntas transversales son:

- cuando se inicia el reciclaje, todos los procesos deben seguirse cuidadosamente, sobre todo aquellos requeridos para sacar el aire de las líneas de suministro de los agentes estabilizadores fluidos y de agua. Todo el aire atrapado en estas líneas debe removerse antes de que el fluido alcance la flauta dosificadora. Si no se realiza la remoción apropiada de estas burbujas es posible reciclar varios metros sin aditivo, teniendo como resultado una sección no estabilizada (o seca) del pavimento; y
- antes de reanudar los trabajos, después de una parada temporal, el tren de trabajo debe ser devuelto por lo menos el diámetro del tambor (aproximadamente 1,5 m) sobre el material previamente reciclado. Con esto se asegurará que todo el material reciba tratamiento cuando se reanuda el proceso.

Como en los pavimentos asfálticos, los problemas producidos por las juntas transversales sólo surgen cuando la operación se detiene. El tren de reciclaje debe entonces detenerse únicamente cuando los carrotanques están vacíos, o en otra situación similar.

4.7 La operación de reciclaje

En esta sección se consideran algunos de los aspectos más importantes que son comunes a todas las operaciones de reciclaje. Los aspectos relacionados con agentes estabilizadores específicos se tratan en el próximo capítulo.

4.7.1 Preparación del tren de reciclaje

El reciclaje sólo debe empezarse una vez que se hayan cumplido todos los requisitos preliminares. Éstos incluyen, en orden secuencial:

- Revisar detalladamente todas las máquinas y los equipos que se van a utilizar en la operación de reciclaje, incluyendo rodillos, máquinas extendedoras y carrotanques;
- Revisar la temperatura de cualquier agente estabilizador bituminoso;
- Comprobar físicamente que la cantidad de agua o de agentes estabilizadores dentro de los diferentes carrotanques, esparcidores y mezcladoras sea suficiente para la longitud de corte programada. Donde sea posible, la cantidad de agentes estabilizadores bituminosos debe verificarse con una barra graduada para tal fin;
- Ensamblar el tren de reciclaje con las barras de empuje (o con el remolque) en la línea del primer corte;
- Conectar todas las mangueras de alimentación a la recicladora, sacar todo el aire del sistema y asegurarse de que todas las válvulas estén completamente abiertas; y
- Revisar que el operador de la recicladora posea toda la información concerniente a la tasa de aplicación de los agentes estabilizadores para que la digite en el computador, que tenga una línea guía clara en toda la longitud de corte y que entienda a la perfección los procedimientos para el inicio de la operación.

Las revisiones preliminares son rápidas y fáciles de realizar, y deben convertirse en una práctica rutinaria cada vez que comienza un turno de trabajo. Además de la revisión de la recicladora, también es aconsejable verificar que los operadores y los conductores de todas las máquinas y los vehículos entiendan claramente sus responsabilidades y lo que se espera que hagan para que la operación de reciclaje sea exitosa.

4.7.2 El inicio

La primera sección reciclada de cada sitio debe asumirse como una práctica para determinar cómo se comportará el material del pavimento existente. Por lo general una sección inicial debe ser de aproximadamente 100 m y cubrir el ancho completo de carril o media calzada de la vía. Este trabajo les dará una idea a los operadores y a los supervisores de los tres aspectos más importantes en la operación de reciclado, a saber:

- **La gradación del material reciclado.** Debe revisarse el material producido por la recicladora para determinar si es similar al de las muestras que se utilizaron para el diseño de la mezcla en el laboratorio. Con un tamizado rápido puede determinarse si el diseño de mezcla es aplicable o no para la sección.
La velocidad de rotación del tambor reciclador y la velocidad de avance de la máquina influirán sobre la gradación del material reciclado. Además, tanto la 2200 CR como la WR 2500 están dotadas de un aditamento que puede ajustarse para limitar el tamaño máximo de las partículas. Estos tres factores deberán variarse para encontrar la mejor combinación, con miras a lograr la gradación requerida.
- **La compactación.** Una de las variables más importantes en el desempeño final de una capa reciclada es la densidad del material compactado. Capas de gran espesor (> 250 mm) requieren frecuentemente técnicas especiales de densificación, y una sección inicial ofrece la oportunidad de evaluar la efectividad de diferentes métodos de compactación.
- **Aumentos en el volumen.** Las capas asfálticas en pavimentos viejos ya fallados tienden a tener bajos contenidos de vacíos, y los materiales naturales (granulares) están, por lo regular, bastante densificados. El reciclaje de estos materiales produce normalmente un aumento en el volumen, que afecta los niveles finales de la capa terminada.

Medir el tiempo requerido para realizar una sección inicial de prueba brinda a los operadores, supervisores y directores una oportunidad ideal para experimentar y entender el comportamiento de los materiales, sin las presiones de las demandas en la producción.

4.7.3 Reciclaje

Rara vez se experimentan problemas durante la operación del reciclaje, cuando se siguen correctamente los procedimientos los procedimientos iniciales (descritos en la sección 4.7.1). De todas maneras, una vez que el tren de reciclaje esté avanzando, deben hacerse una serie de revisiones continuas por parte de un supervisor experimentado para asegurar que el trabajo está dando los resultados requeridos. Es importante prestar atención a ciertos detalles, especialmente:

- A la profundidad de corte a ambos lados de la recicladora;
- A que la recicladora siga la línea de corte establecida con el ancho de traslapo especificado;
- A que el contenido de humedad del material tratado sea suficiente para garantizar una apropiada compactación. Un supervisor experimentado puede determinar esto a simple vista; y
- A que el producto reciclado llene las expectativas. El viejo adagio “Si se ve bien, entonces está bien” puede aplicarse al reciclaje, así como a muchos otros procesos de construcción.

El tipo de agente estabilizador empleado determina la longitud ideal de corte que debe reciclarse antes de girar o dar reverso a la máquina para trabajar el corte adyacente. Cada uno tiene requerimientos diferentes:

- Cuando se trabaja con cemento, normalmente se tratan secciones más cortas, permitiendo así que se pueda reciclar media calzada, nivelar, compactar y terminar la superficie antes de que el cemento haya tenido tiempo para hidratarse; y
- El tamaño del carrotanque utilizado cuando se estabiliza con emulsión asfáltica o con asfalto espumado (para proyectos grandes es ideal un semirremolque de aprox. 25000 l). Antes de dar reverso (o girar) el tren de reciclaje, es común continuar el corte hasta que el carrotanque esté vacío. Girar el tren normalmente requiere desacoplar sus diferentes componentes y, por esta razón, generalmente se prefiere dar reversa.

Hay que tener en cuenta dos puntos más en cuanto a la adición de agentes estabilizadores:

- El material fresado tiende a deslizarse por la pendiente cuando la recicladora está trabajando en una sección transversal a desnivel. Esta tendencia empieza a ser apreciable cuando la pendiente es de más del 2 % y es más pronunciada cuando se reciclan capas con espesores pequeños (< 150 mm). Es aconsejable utilizar una motoniveladora para regresar el material a su lugar antes de ejecutar el corte adyacente, manteniendo así la forma de la vía y asegurando una junta adecuada. En todo caso, cuando la pendiente transversal excede el 6 % la migración se vuelve excesiva, requiriendo así atención especial.
- El consumo real de agentes estabilizadores siempre debe revisarse físicamente, haciendo un reconocimiento de la cantidad de agente estabilizador colocado en el área tratada.

4.7.4 Ubicación del material reciclado

Después del reciclaje, el material tratado debe ubicarse en su posición final y compactarse para cumplir con los requerimientos de densidad. Sin embargo, como se describió anteriormente, hay dos tipos de máquinas recicladoras (de orugas y de ruedas), que van dejando el material atrás en forma diferente:

- La 2200 CR es una máquina de propósito dual, montada sobre orugas. Es una extensión de la fresadora W 2200, con las puntas dispuestas helicoidalmente en el tambor fresador para mandar el material al centro. Cuando se usa para reciclaje, una puerta en la parte posterior de la cámara de trituración se abre para dejar que el material salga como un chorro entre las orugas traseras. La colocación del material en el ancho de corte la realiza un enrasador ubicado en la parte posterior de la máquina.
- La WR 2500 es una máquina recicladora/estabilizadora con un tipo de tambor diferente. El diámetro del tambor es mayor que el de la 2200 CR y las puntas están arregladas en forma adecuada para promover el mezclado. El movimiento lateral del material es mínimo y éste sale de la cámara de mezclado ya extendido en el ancho de corte, asentado por el borde inferior de la compuerta trasera. El material se coloca adecuadamente, pero la pendiente transversal de la superficie la gobierna totalmente la recicladora, ya que la compuerta cuelga de la parte superior de la cámara fresadora/mezcladora.

El trabajo requerido por la motoniveladora después del extendido del material está determinado por el tipo de cubrimiento que se pondrá sobre la capa terminada. Si es una capa asfáltica de espesor significativo, entonces las tolerancias serán invariablemente más generosas que en el caso de que sólo se aplique un sello. Donde las tolerancias son relativamente bajas, el ancho completo tratado debe enrasarse con una motoniveladora para remover las inconsistencias (pequeños escalones de unos 10 mm), que normalmente se forman a lo largo de las juntas longitudinales. Además, una motoniveladora es útil para corregir el intercambio de material que algunas veces ocurre en las juntas transversales. De todos modos, debe restringirse el uso de la motoniveladora. Ciertos materiales reciclados tienden a ser gruesos, particularmente aquellos que se utilizan en capas asfálticas gruesas. Estos materiales son susceptibles de presentar segregación, y debe evitarse todo movimiento innecesario en éstos.

4.7.5 Compactación

Compactar el material reciclado para obtener la densidad especificada es uno de los factores más importantes en el desempeño futuro del pavimento rehabilitado. Un material mal compactado se densificará bajo la acción del tráfico, causando ahuellamientos prematuros. De cualquier manera, cuando el material estabilizado no se compacta apropiadamente, el problema se intensifica, pues además del ahuellamiento temprano, no se alcanzará la resistencia requerida de la capa y el pavimento presentará fallas prematuras. Es entonces imperativo que se le dé a la compactación del material reciclado la misma importancia que a la de las bases tratadas con cemento para construcciones nuevas.

La compactación de capas gruesas (> 200 mm) en una sola etapa es actualmente una práctica normal en muchos países. De todas maneras, para lograr el éxito hay que emplear máquinas compactadoras adecuadas. Muchos fabricantes de equipos de compactación ofrecen una gama de servicios especializados, entrenando a los clientes en la utilización de sus equipos y guiándolos en la selección del más adecuado para cada trabajo específico. La tecnología de la compactación es un tema bien investigado y documentado, y dada la gran variedad de compactadores disponibles en la actualidad, no hay razón para que las capas de espesores considerables no puedan compactarse en una sola etapa.

Actualmente, la herramienta más utilizada para la compactación de capas gruesas es el compactador pesado vibratorio de frecuencia dual (> 15 toneladas de masa estática). Cuando se utiliza este tipo de equipo, es importante asegurar que primero se compacte con una vibración de baja frecuencia y gran amplitud, para densificar la parte inferior de la capa. Luego debe compactarse la parte superior de la capa con alta frecuencia y baja amplitud. Además, deben tenerse en cuenta los siguientes aspectos cuando se utilizan compactadores vibratorios:

- La vibración de baja frecuencia y gran amplitud tiende a afectar el material en la parte superior de la capa, desprendiendo la superficie. Esto se rectifica fácilmente rasando la superficie con una motoniveladora antes de aplicar la vibración.
- El contenido de humedad es la variable más crítica para lograr la densificación con el mínimo esfuerzo. Debido a la demora entre el reciclaje y la terminación del proceso, se recomienda aplicar un pequeño riego de agua sobre la superficie antes de la compactación final.
- Una falla cometida en muchas obras es la “sobrecapactación”, que se presenta cuando se compacta demasiado. El material se romperá y perderá densidad si se continúa la compactación después de que se ha alcanzado la máxima densidad.

Hay que tener en cuenta dos puntos adicionales acerca de la compactación del material reciclado:

- Antes de rasar la superficie con la motoniveladora, debe alcanzarse un estado de compactación uniforme a lo largo del ancho de corte. Las ruedas traseras de la WR 2500 van siempre sobre la superficie del material reciclado, una a cada lado del corte. Esto compacta parcialmente el material por donde van las ruedas, pero deja el material entre ellas sin compactar. El material suelto debe compactarse antes de la nivelación final para evitar desniveles a través de las huellas de las ruedas, resultantes de la compactación diferencial; y
- Los materiales de gradación fina con baja plasticidad tienden a fallar por corte bajo la acción de la compactadora, causando desplazamiento lateral. El agua es la mejor ayuda para la compactación de estos materiales, pero incluso cuando se trabaja en el contenido óptimo de humedad es difícil mantener una superficie final aceptable, requiriendo así una pasada adicional con la motoniveladora para eliminar las distorsiones inducidas por el compactador. De todos modos al ejecutar este corte final debe tenerse especial cuidado para asegurar que toda la superficie se enrasa y que no quedan lentes delgados de material depositados en depresiones poco profundas, formando así “galletas” que no están unidas al material subyacente.

4.7.6 Terminado de la superficie

El terminado de una capa reciclada requiere dejar una textura superficial cerrada que evacúe el agua. Esto se logra normalmente humectando y utilizando un compactador de ruedas neumáticas (este proceso se denomina “pulimento”) para darle suficientes finos a la superficie y llenar así los vacíos entre las partículas más gruesas. Estos procedimientos se incluyen al final del proceso de compactación, pero cuando la vía se va a abrir al tráfico de inmediato, o cuando la utilización de un agente estabilizador impone un límite de tiempo, deben completarse oportunamente.

Tal como con las nuevas construcciones, los requerimientos para finalizar la superficie de una capa reciclada los determinan la naturaleza del material y el tipo de agente estabilizador utilizado. Cuando el material procesado tiene un alto porcentaje de asfalto, el material resultante en el reciclaje tenderá a ser grueso y sin cohesión, siendo así difícil de terminar. Si estas condiciones se identifican a tiempo, se puede adicionar material fino durante el proceso de reciclaje para modificar el producto y aliviar los problemas del terminado.

Cuando se anticipa que la capa reciclada va a utilizarse por un período largo antes de ser cubierta, debe protegerse la superficie para prevenir la pérdida de material, la aparición de baches y otras formas de degradación. La cantidad de tráfico, así como el material y el tipo de agente estabilizador utilizado, gobierna las medidas preventivas necesarias. La aplicación de un sello superficial con arena de río o un agregado de tamaño nominal de 6,7 mm protege en forma adecuada, pero con la utilización de una emulsión diluida (30 % de asfalto residual) en el proceso de “pulimento” se obtendrán resultados sorprendentemente positivos, logrando una superficie enriquecida con asfalto a un costo mínimo.

4.8 Control de calidad

En las secciones anteriores se ha mencionado bastante sobre el control al proceso de reciclaje. Obviamente, la calidad del producto final depende de la correcta ejecución del proceso, de la incorporación de los aditivos requeridos en las cantidades adecuadas y, por último, de la correcta colocación, compactación y terminado del material tratado.

Una vez finalizado el proceso, es necesario que se realicen ensayos de control de calidad, con el propósito de determinar si el material reciclado se comportará de acuerdo con lo esperado, y si se alcanzará la capacidad estructural (o período de diseño) del pavimento rehabilitado. Los requerimientos de calidad están normalmente reunidos en un conjunto de especificaciones propias del proyecto que indican con claridad los criterios de aceptación. Los resultados de los ensayos probarán si el producto cumple con los criterios de aceptación, permitiendo que el contratista trabaje con confianza, o resaltarán las áreas con problemas, permitiendo que los esfuerzos se enfoquen en su solución inmediata.

La calidad del trabajo terminado se determina a partir de los resultados de los ensayos que muestran:

- **La resistencia relevante del material en la capa reciclada.** Ésta puede determinarse indirectamente, haciendo ensayos de laboratorio sobre muestras de material mezclado y dejado atrás por la recicladora, o directamente, estableciendo la resistencia real de núcleos tomados de la vía.

Debido a la inevitable demora entre el terminado y la toma de núcleos, se prefiere el método indirecto. Los núcleos sólo pueden tomarse una vez que el material ha alcanzado suficiente resistencia, lo cual produce un retraso, mientras que los resultados de los ensayos realizados sobre muestras tomadas del material dejado por la recicladora pueden obtenerse en unos pocos días.

- **La densidad seca del material compactado.** Aunque la medida de la densidad en el terreno es el ensayo frecuentemente ejecutado en las obras, deben tenerse en cuenta los siguientes puntos:

- el nivel requerido de compactación siempre se especifica y determina en función de la “densidad relativa”. Éste es la medida de la densidad seca en el terreno, expresada como porcentaje de la “densidad seca máxima” teórica (DSM). La DSM no es una propiedad del material, sino la densidad que el material logra cuando se somete a una energía de compactación estándar, aplicada cuando tiene el contenido óptimo de humedad. Existen diferentes estándares de energía de compactación utilizados alrededor del mundo, siendo los más comunes:

- i. el “proctor estándar”, que se ejecuta de acuerdo con la norma ASTM D698 (o la AASHTO T99), que usa un martillo de 2,495 kg (5,5 lb), con una altura de caída de 30,48 cm (12 in) por golpe, o
- ii. el “AASHTO modificado”, que se describe en la norma ASTM D1557 (o AASHTO T180), que usa un martillo de 4,583 kg (10 lb), con una altura de caída de 45,72 cm (18 in) por golpe.

Ya que la energía de compactación es diferente para cada estándar, la DSM también será diferente. Resulta entonces fundamental determinar cuál estándar se va a utilizar.

- El material reciclado puede variar de manera significativa, tanto transversal (a menudo como resultado de operaciones de ensanchado anteriores), como longitudinalmente, debido sobre todo a las diversas fuentes de material utilizadas en la construcción original. Hay que tener cuidado entonces al seleccionar la DSM. Cuando exista duda al respecto, deben tomarse muestras adicionales para determinar la DSM del material para cada zona.
- Los densímetros nucleares se utilizan comúnmente en obra para determinar la densidad. Cuando hay material fresado en el material reciclado, el contenido de humedad medido será invariablemente mayor, dando como resultado reportes de densidades secas más bajas que las reales. Este fenómeno se produce por el método para medir la humedad – neutrones rápidos emitidos por una fuente (como berilio), frenados o calentados por hidrógeno. El número de neutrones frenados se cuenta utilizando un aparato que no es afectado por neutrones rápidos (como el Helio-3) y utilizado como una medida del hidrógeno en el material.

Las moléculas de agua, con dos átomos de hidrógeno, son la principal fuente de hidrógeno en un material natural. En todo caso, muchos otros componentes tienen hidrógeno (como el asfalto) y éstos hacen que una correlación directa entre el conteo de hidrógeno y el contenido de humedad sea imposible. Los densímetros nucleares pueden calibrarse para tener en cuenta estos componentes, pero si un material reciclado contiene material fresado en proporciones variables, y el contenido de asfalto del material fresado no es constante, estas calibraciones no son prácticas. Una manera de superar este problema es tomar una muestra de cada sección de ensayo y determinar el contenido de humedad en el laboratorio. Alternativamente, se puede utilizar el método del cono y la arena (ASTM D1556, o AASHTO T191).

- **El espesor de la capa terminada.** Esta es una de las dos variables críticas que afectan el desempeño a largo plazo de la capa estabilizada. (La otra es la respuesta del material a la repetición de cargas, supuesta a partir de las características de resistencia y densidad ya descritas.) El espesor es usualmente revisado por medidas físicas. Con núcleos pequeños o perforaciones de ensayo puede obtenerse evidencia visual del espesor de la capa, cuando se ha utilizado un densímetro nuclear.

Ninguna discusión de calidad está completa sin mencionar el aspecto más importante de los pavimentos para vías: el drenaje. Con mucha frecuencia las capas se terminan sin considerar lo que le puede pasar a la superficie si se presentan lluvias. Un problema que ocurre a menudo es el de estancamiento de agua sobre la superficie debido a la hierba existente a lo largo del borde, saturando el material del pavimento y produciendo baches por la acción del tráfico. Estos problemas pueden prevenirse fácilmente con un mínimo esfuerzo después de terminado el reciclaje.

Capítulo 5: Agentes estabilizadores

El primer registro del uso de agentes estabilizadores para la construcción de carreteras data de hace aproximadamente dos mil años y fue realizado por los romanos. Además de sus sistemas avanzados de pavimentación en bloques segmentados (adoquines de piedra), también usaron una forma de tratamiento con cal con el objeto de mejorar la resistencia de los pavimentos para soportar vagones de transporte de carga pesada. Actualmente, los agentes estabilizadores se usan en todo el mundo para superar las limitaciones inherentes a los materiales naturales sobre el comportamiento del pavimento; aparte de incrementar las características de resistencia de un material, estos agentes aumentan su durabilidad y su resistencia frente a la acción del agua.

Debido a que en muchos países no se consiguen materiales de buena calidad para la construcción de carreteras y que los costos de transporte para importar materiales adecuados son bastante elevados, se ha promovido el desarrollo de técnicas de estabilización para poder usar las fuentes disponibles. A menudo las resistencias requeridas pueden obtenerse con materiales marginales locales mediante la adición de pequeñas cantidades de un agente estabilizador, a un precio relativamente bajo. Estas técnicas son aplicables tanto al reciclaje como a nuevas construcciones. Al adicionar el agente estabilizador puede mejorarse el material recuperado del pavimento, evitándose de esta manera importar nuevos materiales para alcanzar la resistencia necesaria en la estructura del pavimento rehabilitado.

Sin embargo, existen algunos conceptos errados con respecto al propósito de los agentes estabilizadores, a su comportamiento y aún más importante, a cuándo debe considerarse o excluirse el uso de varios de ellos. En este capítulo pretende aclararse estos aspectos.

5.1 Tipos de agentes estabilizadores

5.1.1 Generalidades

Actualmente, se usa un amplio rango de agentes estabilizadores en el mundo; éstos incluyen compuestos químicos, tales como cloruro de calcio, polímeros de cadena larga y productos sulfatados del petróleo, al igual que otros productos patentados y agentes más convencionales como el cemento. Todos persiguen el mismo objetivo; ligar las partículas individuales para incrementar la resistencia o hacer el material más resistente al agua. Algunos agentes son más efectivos sobre materiales específicos y otros tienen claras ventajas económicas, pero todos cuentan con un lugar en el mercado; además, la mayor parte de ellos ofrece mejores resultados cuando se usan con máquinas recicladoras modernas.

Continuamente se están desarrollando nuevos productos siendo importante para la industria contar con una buena experimentación. Siempre debe promoverse la innovación, ya que no puede pretenderse que un solo agente estabilizador sea el mejor para todas las aplicaciones. Los ingenieros tienen que mantener su mente abierta cuando se enfrentan a la toma de decisión de cuál agente usar en un proyecto específico. Tales decisiones invariablemente están influidas en orden de importancia, por los siguientes factores:

- **Precio.** El costo unitario del estabilizador (expresado normalmente en pesos por metro cuadrado de capa terminada) siempre será la preocupación principal.
- **Disponibilidad.** En varias partes del mundo no se consigue un agente estabilizador específico. Las emulsiones asfálticas son un ejemplo, ya que actualmente no se fabrican en ciertos países.
- **Características del material.** Algunos agentes estabilizadores son más efectivos que otros sobre cierto tipo de materiales. Por ejemplo, se prefiere la cal en lugar del cemento cuando van a estabilizarse suelos de alta plasticidad.
- **Política.** Algunos propietarios de carreteras, a menudo influenciados por experiencias anteriores, tienen políticas rígidas en relación con el uso de ciertos tipos de agentes estabilizadores.

Los métodos de estabilización adoptados a este respecto varían de país a país y de un propietario a otro, pero muchas veces estas diferencias no se basan en méritos técnicos. La tecnología no conoce fronteras; si los criterios de ensayo son comunes, las características de resistencia medidas en Rusia pueden compararse con las medidas en Venezuela. Por tanto, no existe una razón real para excluir un agente estabilizador específico que cumpla con los requerimientos técnicos exigidos.

Los ingenieros tienden a ser conservadores por naturaleza. A menudo prefieren prácticas experimentadas y ensayadas debido a que estar en la frontera de la tecnología puede representar un riesgo, así como una experiencia aislada. Por eso los agentes estabilizadores cementantes y sus homólogos, los materiales bituminosos, se han investigado ampliamente. Se usan de manera extensiva, encontrándose disponibles métodos estándar de ensayo para determinar el diseño óptimo de las mezclas y asegurar los requerimientos de calidad. Adicionalmente, tanto el cemento como el asfalto tienen un amplio uso en la industria de la construcción y por lo general se encuentran disponibles en cualquier parte del mundo; por esto no sorprende que sean los agentes estabilizadores más populares.

5.1.2 Agentes estabilizadores cementantes

La cal, el cemento y la mezcla de estos productos con cenizas volantes, escorias de alto horno y otros materiales, corresponden a los agentes estabilizadores cementantes comúnmente usados. Aparte de las experiencias realizadas por los romanos con cal, el cemento ha sido el material que se ha utilizado por mayor tiempo, encontrándose el primer reporte de su empleo formal como agente estabilizador en 1917, en Estados Unidos.

La principal función de estos agentes es incrementar la resistencia, además de la cal liberada durante el proceso de hidratación reacciona con los minerales arcillosos presentes en los suelos, reduciendo su plasticidad. El uso del cemento debe limitarse al tratamiento de materiales que presenten un índice de plasticidad menor que 10. La cal es el mejor agente estabilizador para materiales de mayor plasticidad.

La resistencia alcanzada depende en gran parte de la cantidad de agente estabilizador que se incorpore, pero también del tipo de material que va a tratarse. Contrario al punto de vista de algunos expertos, la adición de una mayor cantidad de agente estabilizador para lograr una mayor resistencia puede ir en detrimento del comportamiento de la capa. Un material tratado con agentes cementantes tiende a ser semifrágil, y al incrementar la resistencia se hace más frágil, con una consecuente disminución de las propiedades de fatiga de la capa estabilizada. Lo anterior conduce, invariablemente, a una proliferación de grietas indeseables por efecto de las cargas repetidas del tráfico. Resulta por tanto importante que los requerimientos de comportamiento de la capa tratada no sean ambiguos y que se realice un diseño apropiado de la mezcla sobre muestras representativas con el objeto de determinar la dosificación correcta.

5.1.3 Agentes estabilizadores bituminosos

El uso del asfalto como agente estabilizador, aplicado en forma de emulsión o de espuma, es cada vez más popular gracias a los avances tecnológicos. Para la estabilización de capas delgadas se han aplicado de manera exitosa algunos asfaltos líquidos, pero las tendencias actuales en la protección ambiental los hacen poco populares hoy en día.

Los materiales estabilizados con asfaltos no sufren el fenómeno de agrietamiento por contracción asociado a los tratamientos con cemento y pueden abrirse al tráfico inmediatamente debido a la liga inicial (resistencia) que se presenta entre partículas de la superficie, lo que previene el descascaramiento con la acción del tráfico. Si la superficie se encuentra correctamente terminada, la apertura temprana al tráfico rara vez afectará de manera negativa el material estabilizado. Como mínimo durante la primera semana, mientras el material gana resistencia, no deben estacionarse vehículos pesados sobre la capa tratada, entre ellos equipos de compactación.

El tratamiento con asfalto es una manera económica de mejorar la resistencia de un material y reducir el efecto del agua. Comparados con los agentes estabilizadores cementantes, los materiales ligados con asfalto producen una capa flexible con propiedades superiores a la fatiga, permitiendo reducir así el espesor de la capa sin sacrificar la capacidad estructural del pavimento.

Existen dos tipos de procesos de reciclaje, muy diferentes, que utilizan asfalto:

- Reciclaje exclusivo de carpetas asfálticas delgadas. En este proceso la emulsión asfáltica se utiliza con el objeto de rejuvenecer el asfalto envejecido del pavimento existente. Esencialmente corresponde a un proceso in situ de mezclas en frío y no a un proceso de estabilización.
- Un proceso de estabilización en el cual el asfalto se usa para estabilizar el material reciclado. Normalmente este proceso es aplicable cuando el espesor de la capa es mayor que 100 mm.

Es importante entender que el reciclaje profundo con agentes estabilizadores bituminosos da lugar a un material estabilizado que no se parece a una mezcla asfáltica. Las bases asfálticas de gradación continua presentan por lo general un contenido de vacíos de aproximadamente 4 %. A diferencia de las mezclas manufacturadas, la gradación que se obtiene de un material reciclado depende en gran medida del tipo de material presente en la estructura del pavimento. Por lo regular, los materiales estabilizados con asfalto tienen un contenido de vacíos que oscila entre 10 y 20 % y tienden a comportarse en parte como un material granular, capaz de soportar los esfuerzos por la fricción entre partículas, y en parte también como un material viscoelástico que puede soportar esfuerzos de tensión repetitivos. Por tanto, son híbridos.

Algunos materiales marginales tratados con agentes estabilizadores bituminosos presentan bajas propiedades de resistencia conservada (pierden resistencia cuando se sumergen en agua), pero dicha característica puede superarse mediante la adición de cemento. Pequeñas cantidades de cemento o de cal (0,5 a 2 % en masa) pueden incrementar de manera significativa la resistencia conservada, sin afectar las propiedades de fatiga de la capa. Por tanto, generalmente se usa cemento o cal con agentes estabilizadores bituminosos, excepto cuando sólo se recicla material fresado.

5.2 Estabilización con cemento

5.2.1 Generalidades

El cemento corresponde al agente estabilizador más usado. Su empleo excede en gran medida el de los demás agentes estabilizadores combinados debido principalmente a su disponibilidad, pues el cemento se manufactura en muchos países y está disponible alrededor del mundo. Otra razón radica en su aceptación como material de construcción. Existen diferentes estándares, métodos de ensayo y especificaciones disponibles para los tratamientos con cemento, así como numerosos ejemplos de pavimentos con capas estabilizadas con cemento de buen comportamiento.

No obstante, a estabilización con cemento requiere una atención especial, ya que todos los materiales tratados con cemento, incluyendo el concreto, son propensos al agrietamiento. Sin embargo esto puede controlarse y no necesariamente es perjudicial, como se explica en la siguiente sección.

5.2.2 Agrietamiento del material tratado con cemento

Es importante reconocer que los materiales tratados con cemento tienden a agrietarse por dos razones muy diferentes: la primera es por la reacción química que tiene lugar cuando el cemento se hidrata en presencia de agua y por tanto no es inducida por el tráfico, y la segunda se debe a las cargas repetitivas del tráfico. En cada caso, la iniciación de las grietas y su subsecuente propagación son bastante diferentes, por lo cual se comentarán por separado.

- **Grietas no originadas por el tráfico.**

Cuando un material es tratado con cemento resulta inevitable la formación de grietas, pues a medida que el cemento se hidrata, se forman complejos cristales de silicato de calcio que ligan las partículas del material. Adicionalmente a la generación de calor y a otros numerosos cambios que se producen durante esta reacción química, el material experimenta un cambio de volumen y se contrae, dando lugar a las grietas por contracción. Estas grietas son inevitables y constituyen uno de los riesgos de trabajar con cemento. La intensidad (separación entre grietas) y la magnitud (ancho de la grieta), o el grado de agrietamiento, están influidos en gran medida por:

- **El contenido de cemento.** La contracción que ocurre durante la hidratación es función de la cantidad de cemento presente. A medida que se incrementa el contenido de cemento aumenta el grado de agrietamiento, siendo esta una de las principales razones para minimizar su incorporación y cumplir con las exigencias del diseño. La adición de muy bajos contenidos de cemento (<2 % en masa) solamente debe considerarse si éste se inyecta en el proceso de reciclaje en forma de lechada.
- **El tipo de material por estabilizar.** Algunos materiales tienden a contraerse más que otros cuando se tratan con cemento. Adicionalmente, ciertos materiales plásticos son más activos, y presentan cambios significativos de volumen entre los estados húmedo y seco. Cuando el IP (índice de plasticidad) del material es mayor que 10, debe adicionarse cal o una combinación de cal y cemento para reducir la plasticidad, ojalá hasta un estado no plástico.

- **El contenido de humedad en la compactación.** El grado de agrietamiento es función de la cantidad de humedad que se pierde a medida que el material se seca. Éste puede reducirse significativamente, limitando el contenido de humedad en el momento de la compactación a menos del 75 % de la humedad de saturación.

- **La velocidad de secado.** Cuando el material tratado con cemento se contrae, se inducen esfuerzos internos en el mismo. El grado de agrietamiento es altamente dependiente de la relación entre las velocidades con que se desarrollan la resistencia y los esfuerzos de contracción. Si el material se seca con rapidez, los esfuerzos generados por la contracción superarán la resistencia desarrollada, en tanto que el patrón de grietas será más intenso (2 m x 2 m) y las grietas angostas. Cuando el secado es lento se observará un patrón de menor intensidad (6 m x 4 m), con grietas anchas. Un curado apropiado de la capa terminada prevendrá el secado de la superficie, reduciendo la intensidad y la magnitud del agrietamiento.

Las grietas por contracción son más anchas en la superficie que en la base (el secado se inicia en la superficie) y sus paredes son irregulares, permitiendo una transferencia efectiva de las cargas del tráfico debido a la trabazón mecánica que se presenta entre las caras de la grieta.

- **Grietas causadas por el tráfico.**

Este tipo de grietas se presenta cuando el material tratado con cemento se encuentra sobreesforzado o se ha excedido su vida de fatiga. Las grietas comienzan en la base de la capa, donde los esfuerzos de tensión inducidos por las cargas del tráfico son máximos y, a su vez, generan las máximas deformaciones. Las capas tratadas con cemento son semifrágiles y exhiben propiedades elásticas relativamente pobres y, por ende, sensibles a las sobrecargas.

Las grietas por fatiga ocurren después de un número predecible de repeticiones de carga. Esta clase de grietas no implica una falla inminente. Luego del agrietamiento inicial, la capa todavía es capaz de soportar las cargas del tráfico y en este estado la capa puede modelarse reduciendo el valor de su módulo. La intensidad y la magnitud de las grietas se incrementan a medida que la capa se deteriora con las cargas de tráfico posteriores. Esta reducción en el módulo continúa hasta que finalmente el material regresa a la condición granular anterior a su estabilización.

5.2.3 El trabajo con cemento

Como se describió anteriormente, en los materiales tratados con cemento resulta inevitable la generación de grietas por contracción; sin embargo, el grado de agrietamiento y la calidad total de la capa estabilizada son el resultado de los siguientes factores:

- **Diseño de la mezcla.** Es muy importante que se lleven a cabo diseños de mezclas apropiados sobre muestras representativas del material que va a tratarse con cemento. (En el Apéndice 2 se incluye un ejemplo del procedimiento de laboratorio.) Materiales diferentes requieren concentraciones diferentes de cemento para alcanzar las resistencias especificadas.
- **Calidad del cemento.** El cemento tiene un período de almacenamiento definido y, como regla, no debe usarse después de tres meses de fabricación. Determinar la edad del cemento es difícil, en particular cuando éste se despacha en bultos. Si existe alguna duda sobre la edad del cemento o sobre otros aspectos respecto a su calidad, deben ensayarse muestras para verificar los parámetros de resistencia.
- **Uniformidad de la aplicación.** Hay tres maneras diferentes de aplicar el cemento. En las dos primeras, el cemento seco en polvo se riega sobre la superficie del pavimento existente antes del reciclaje y en la tercera se inyecta una lechada de cemento dentro de la cámara de fresado, mientras se recicla.
 - **Despachado en bultos y regado manual.** Este es el método más popular en los países en desarrollo, debido a que la mano de obra es barata y abundante. Si se marca la superficie existente con una cuadrícula y se señala el área que se cubrirá con un bulto de cemento, puede alcanzarse una buena precisión. El extendido se hace cuidadosamente con una cuchilla de caucho, hasta alcanzar una capa uniforme.

- **Irrigadores.** Corresponde a un método de aplicación ampliamente usado. Diferentes sistemas (bandas transportadoras, alimentadores, aspersores neumáticos), cada uno con sus ventajas y limitaciones, se emplean para descargar la cantidad requerida de cemento sobre la superficie de la carretera. Generalmente se hacen ensayos sobre diferentes sectores para verificar la velocidad de aplicación.

El cemento esparcido en seco resulta afectado por las condiciones climáticas, particularmente por el viento y la lluvia. Por ser un polvo fino, el cemento es susceptible a la erosión por el viento, siendo llevado por el aire rápidamente cuando sopla una brisa o afectado por las ondas que genera el paso de los camiones. Tales pérdidas reducen la tasa de aplicación de una manera no uniforme. Así mismo, la lluvia que cae sobre el cemento que está esparcido dispara el proceso de hidratación, requiriendo su mezcla inmediata o su rechazo.

- **Inyección en forma de lechada.** La WM 1000 está especialmente diseñada para mezclar el cemento con el agua para producir una lechada, en la que el volumen de agua agregada iguala la cantidad necesaria para alcanzar el contenido de humedad óptimo (OMC = Optimum Moisture Content). La lechada se trata como un agente estabilizador líquido y se bombea a la máquina recicladora, para luego inyectarla a la cámara de mezclado a través de una barra irrigadora. Este es el método de aplicación más preciso.

- **Uniformidad de la mezcla.** En diferentes países se han realizado suficientes ensayos para demostrar que la capacidad de mezclado de las grandes máquinas recicladoras es similar a la alcanzada en plantas centrales. Cuando se trabaja con máquinas recicladoras modernas, los factores de seguridad usados con frecuencia para compensar un mezclado pobre pueden reducirse o incluso omitirse.
- **Adición de agua.** Como regla general, los materiales tratados con cemento deben trabajarse en la condición más seca posible, con el objeto de minimizar las grietas por contracción. Cuando se requiera la incorporación de agua, ésta debe inyectarse dentro de la cámara de mezclado, controlando de manera estricta su adición para obtener un contenido de humedad que nunca exceda el 75 % del contenido de humedad de saturación del material.
- **Curado.** Una vez terminada, debe prevenirse el secado de la superficie de la capa estabilizada con cemento durante un período mínimo de siete días. Como ya se describió, las grietas por contracción se desarrollarán en la superficie si la velocidad de secado supera la de ganancia de resistencia. El secado puede prevenirse mediante riegos, a intervalos regulares, de la superficie con agua, usando una barra irrigadora de ancho total con boquillas finas. Si se espera que la capa esté sometida al tráfico por un período extenso, puede aplicarse un sello temporal o una capa asfáltica como una membrana de curado antes de los siete días.

A menudo la calidad de la capa terminada se juzga a partir de la resistencia a la compresión inconfiada (UCS = Unconfined Compressive Strength) de una muestra tomada de la mezcla dejada por la recicladora. Cuando esto se haga, es importante controlar regularmente el tiempo transcurrido entre el muestreo en campo y la compactación de las probetas en el laboratorio, considerando que en el ensayo deben simularse las condiciones de campo. Cualquier demora significativa puede dar lugar a bajas resistencias, a causa de la hidratación del cemento antes de la compactación.

5.2.4 Tráfico temprano

Normalmente el ancho total de la vía está abierto al tráfico fuera del horario normal de trabajo. Con frecuencia se expresan inquietudes referentes a la apertura temprana al tráfico de los materiales estabilizados con cemento, las cuales sólo son relevantes si no se siguen los procedimientos de curado necesarios. Permitir el secado de la superficie puede producir el descascamiento y la pérdida de resistencia de la parte superior de la capa, causando finalmente el desarrollo de baches; por esto la superficie tiene que humedecerse en forma constante mediante ligeros riegos de agua. Además, no se la debe exponer al tráfico pesado por períodos extensos sin la protección, como mínimo, de un sello.

5.2.5 Criterios para las capas estabilizadas con cemento

Las propiedades más importantes aplicables a los materiales tratados con cemento son:

- **Resistencia.** El ensayo comúnmente usado para evaluar los materiales cementados es el UCS,

ya que el ensayo de CBR no se considera lo bastante sensible para evaluar materiales de alta resistencia. El ensayo UCS normalmente se realiza sobre muestras preparadas que han sido curadas durante siete días a una temperatura de 22°C y una humedad superior al 95 %. Algunos métodos de ensayo permiten que se acelere el curado poniendo las probetas en horno a 75°C durante 24 horas.

El contenido de cemento que dé lugar a valores de la UCS entre 1,5 y 3 MPa normalmente se considera como el óptimo para el material reciclado. Generalmente se requieren las siguientes dosificaciones de cemento, expresadas como un porcentaje de la masa del material reciclado:

- Material fresado/piedra triturada (mezcla 50/50) – 2,0 a 2,5 %
- Piedra triturada – 2,0 a 3,0 %
- Grava natural (IP < 10, CBR > 30) – 3,0 a 4,0 %

- **Tiempo de procesamiento.** El mezclado, colocación, compactación y terminado deben llevarse a cabo en el menor tiempo posible. Para los materiales tratados con cemento, normalmente se especifica un tiempo límite de cuatro horas, medido desde el primer momento en que el cemento entra en contacto con el material hasta cuando se termina la compactación. Con el uso de equipos modernos de reciclaje, es posible reducir este tiempo a menos de una hora.
- **Densidad.** Para cada sitio de ensayo normalmente se especifica una densidad (promedio) de mínimo el 97 % de la densidad AASHTO modificada. Algunas veces se permite una variación de densidad, precisando una densidad promedio, lo que significa que la densidad en la parte superior de la capa puede ser mayor que la de la base. Donde se especifique, también es normal incluir una desviación máxima del 2 % para la densidad medida en el tercio inferior de la capa. Así, si la densidad promedio fijada es del 97 %, entonces la densidad en la base de la capa debe ser mayor del 95 %.

5.3 Estabilización con emulsión asfáltica

5.3.1 Generalidades

Originalmente las emulsiones asfálticas se desarrollaron como un medio para superar las dificultades que se presentan al trabajar con cementos asfálticos calientes, en particular para la estabilización y para el mezclado, a temperatura ambiente, con materiales humedecidos.

Una emulsión está constituida por dos líquidos no miscibles, uno disperso en el otro en forma de pequeños glóbulos o gotas. En las emulsiones asfálticas convencionales, el asfalto se encuentra disperso en una fase continua que es el agua. Mediante agentes de superficie activa (emulsificantes) se previene que las partículas de asfalto se junten nuevamente, al formar una película protectora alrededor de las mismas. Muchas de las emulsiones usadas como agentes estabilizadores tienen un contenido de “asfalto residual” del 60 %, lo que significa que el 60 % del volumen de la emulsión es asfalto disperso en un 40 % de volumen de agua.

Después de mezclarse con el material, el agua se pierde y las partículas de asfalto se juntan otra vez en una película continua depositada sobre la superficie de los agregados. Este proceso, conocido como “rotura”, se ve afectado por:

- Pérdida de agua por evaporación o absorción en el material con que se está mezclando;
- Coagulación química debida a la reacción que ocurre entre la emulsión y el agregado;
- Alteración mecánica causada por presiones de bombeo excesivas, por la acción de mezclado y por los esfuerzos de compactación; y
- Composición química de la emulsión.

Normalmente se usa cemento junto con la emulsión asfáltica, puesto que este no sólo mejora la resistencia conservada, sino que también actúa como un catalizador, incrementando las propiedades de resistencia a corto plazo y facilitando de esta manera la acomodación del tráfico. Investigaciones realizadas sobre el efecto de la combinación de cemento con emulsión asfáltica han demostrado que no hay una reducción significativa de las características de fatiga de la capa estabilizada al incorporar hasta un

2 % en masa de cemento. Sin embargo, en algunos países es común agregar mayores porcentajes de cemento mientras se estabiliza con una concentración similar de emulsión asfáltica.

5.3.2 Tipos de emulsiones asfálticas

Existen dos tipos de emulsiones asfálticas: aniónicas y catiónicas, que se diferencian básicamente por la carga de los iones de asfalto dispersos y de la fase continua. En una emulsión aniónica las partículas de asfalto se encuentran cargadas negativamente en una fase alcalina, mientras que en la catiónica las partículas de asfalto poseen carga positiva en una fase ácida. Ciertos productos químicos, conocidos como “estabilizantes”, se agregan a los dos tipos de emulsiones con el propósito de incrementar el tiempo de rotura al reducir la magnitud de la carga sobre las partículas de asfalto y su atracción con los agregados, retardando de esta manera la rotura o la atracción de las partículas de asfalto a los agregados.

En algunos países, los recicladores confunden las emulsiones aniónicas y las emulsiones catiónicas, especialmente en cuanto a sus condiciones de rotura. Se ha dicho que las aniónicas solamente rompen cuando el agua, en la cual se encuentra suspendido el asfalto, se evapora o es absorbida por el agregado o el cemento. Por otra parte, se supone que las emulsiones catiónicas rompen “químicamente”, lo que implica que se agreguen químicos especiales durante su proceso de manufactura, que causarán que el asfalto se separe del agua después de un período específico de tiempo. Esto no es del todo cierto. Ambos tipos de emulsiones se comportan de la misma manera en su rompimiento cuando se retira físicamente el agua y ambos romperán si la carga sobre las partículas del agregado es opuesta a la de las partículas de asfalto, generándose atracción entre ellos.

La razón exclusiva para usar un asfalto emulsificado como agente estabilizador es posibilitar su mezcla con los agregados fríos y húmedos. Esta es una fase transitoria y el producto final deseado corresponde a un material ligado con asfalto que requiere que éste rompa fuera de la suspensión, con el objeto de actuar como un ligante. Las condiciones de rotura son, por tanto, importantes y no el ambiente en el cual el asfalto está suspendido en el agua.

5.3.3 El trabajo con emulsiones asfálticas

Cuando se recicla con emulsión, los siguientes puntos son importantes y deben cumplirse:

- **Diseño de la mezcla.** Como con cualquier forma de estabilización, debe seguirse un procedimiento apropiado para el diseño de la mezcla con el fin de establecer la concentración correcta con la que se alcancen los criterios de resistencia. (En el Apéndice 2 se incluye un ejemplo del procedimiento de laboratorio.) Materiales diferentes requieren dosificaciones distintas de la emulsión para lograr la resistencia óptima.
- **Formulación.** Diferentes productos químicos se usan en proporciones variables para ajustar la emulsión a una aplicación específica. Este ajuste consiste en determinar la cantidad de asfalto residual y en controlar las condiciones en las cuales se presenta la rotura. Debido a que el tipo de material, que se mezcla con la emulsión, tiene una mayor influencia sobre la estabilidad (tiempo de rotura) es importante que al fabricante se le entregue una muestra representativa del material que se reciclará. Así mismo, deben suministrarse los detalles de cualquier agente estabilizador cementante que vaya a incorporarse junto con la emulsión, con el objeto de realizar su correcta formulación.
- **Manejo.** Las emulsiones asfálticas son susceptibles a la temperatura y a la presión. Deben entenderse claramente las condiciones que promueven al asfalto a disgregarse de la suspensión (lentamente como “floculación” o de forma instantánea como rotura instantánea o relámpago) con el propósito de prevenir que esta disgregación suceda en el campo. De igual manera, para obtener una correcta formulación de la emulsión, el fabricante ha de conocer las condiciones prevalecientes en obra, incluyendo los detalles de todas las bombas que se utilizarán para transferir la emulsión entre tanques y para suministrar a la barra de rociado en la recicladora.
- **Contenido total de fluidos.** El control de la humedad en el material reciclado es uno de los aspectos más importantes de la estabilización con emulsiones asfálticas, y es por esta razón que se considera por separado en la sección 5.3.4.
- **Tiempo para la compactación.** Cuando la emulsión rompe, el asfalto sale de la suspensión volviendo a su forma viscosa. Las partículas individuales del material reciclado se cubrirán total o parcialmente con una película fina de asfalto frío y viscoso, dificultando su compactación; por tanto, la

compactación debe completarse antes de que la emulsión haya roto.

- **Control de calidad.** Normalmente se manufacturan probetas (para los ensayos de resistencia) usando muestras tomadas de la mezcla dejada por la máquina recicladora. Estas briquetas deben compactarse antes de que rompa la emulsión, obteniendo muestras que reflejen las condiciones del material compactado en la vía. Un sistema móvil de compactación Marshall en el sitio es, a menudo, la única forma de fabricación de probetas. Alternativamente, pueden extraerse núcleos una vez que la capa haya curado por completo.
- **Curado (velocidad de ganancia de resistencia).** Aun cuando algunos materiales estabilizados con emulsiones asfálticas pueden alcanzar su resistencia total en un corto período de tiempo (un mes), en otros materiales el curado puede tener lugar en más de un año. La duración de este período se ve afectada por:
 - El tipo y la calidad de la emulsión asfáltica;
 - El contenido de humedad del material durante la compactación;
 - La densidad alcanzada (indicativa del contenido de vacíos);
 - El tipo de agregado, incluyendo su gradación y sus propiedades de absorción; y
 - La cantidad de cemento o de cal incorporada.

La adición de cemento tiene un impacto significativo sobre la velocidad con que se gana resistencia. Sin embargo, diversas investigaciones han mostrado que la adición de más del 2% de cemento afecta de manera negativa las propiedades de fatiga de la capa estabilizada y por esta razón la cantidad de cemento usualmente se limita al 2 %.

5.3.4 El concepto de la cantidad total de fluidos

Cuando se trabaja con emulsiones asfálticas, en la definición de la relación humedad / densidad se emplea el concepto de “contenido total de fluidos” en lugar del concepto de contenido de humedad. La máxima densidad se alcanza con el contenido óptimo de fluidos totales (OTFC = Optimum Total Fluid Content), que corresponde a la suma de las masas, en la mezcla, de humedad y emulsión asfáltica (antes de la rotura). Antes de la rotura, la emulsión asfáltica es un fluido que presenta una viscosidad similar a la del agua. Si se agrega un 5 % de emulsión con un contenido de asfalto residual del 60 %, los fluidos incorporados serán del 5 % y no solamente del 2 %, correspondiente al componente de agua. Como el contenido total de fluidos resultante en un material (contenido de fluidos en el campo) excede el OTFC, es difícil compactar la mezcla a la densidad requerida. Si el contenido de fluidos en el campo es demasiado alto, superando el de fluidos de saturación de la mezcla, entonces se desarrollarán presiones hidráulicas que originan la expansión del material con la acción de los equipos de compactación. Al alcanzarse estas condiciones, es imposible compactar el material.

Cuando la humedad del material en el pavimento existente está próxima al OTFC, la incorporación de la emulsión invariablemente incrementará el contenido total de fluidos más allá del punto de saturación. Esto no puede enmendarse reduciendo la cantidad de fluidos que son agregados, y con la incorporación de cemento sólo se logra de manera parcial la corrección. (Como ya se mencionó, la cantidad de cemento que puede incorporarse se encuentra limitada.) Por lo general esta situación se supera, permitiendo que el material fresado se seque suficientemente antes de la estabilización.

5.3.5 Criterios para las capas estabilizadas con emulsión asfáltica

A continuación se dan las propiedades más importantes, aplicables a los materiales estabilizados con emulsión asfáltica. Estas propiedades se alcanzan cuando se optimiza la dosificación de la emulsión, a partir de un procedimiento de diseño de la mezcla. Adicionalmente al 1 o 2 % de cemento incorporado, se manejan los siguientes rangos de asfalto residual:

- | | | |
|--|---|-------------|
| - Material fresado/piedra triturada (mezcla 50/50) | - | 1,5 a 3,0 % |
| - Piedra triturada | - | 2,5 a 4,0 % |
| - Grava natural (IP < 10, CBR > 30) | - | 3,0 a 4,5 % |

- **Resistencia.** Los materiales estabilizados con asfalto normalmente se evalúan mediante la resistencia a la tracción indirecta (ITS = Indirect Tensile Strength) y no con los ensayos Marshall. El ensayo se realiza sobre probetas tipo Marshall, a una temperatura de 25°C. Los siguientes valores de la ITS (en condición seca) son típicos:

- Material fresado/piedra triturada (mezcla 50/50)	-	350 a 750 kPa
- Piedra triturada	-	400 a 800 kPa
- Grava natural (IP < 10, CBR > 30)	-	250 a 500 kPa
- **Rigidez.** El módulo resiliente de un material estabilizado con asfalto se mide sometiendo la muestra a un ensayo con cargas repetitivas. Los valores típicos son:

- Material fresado/piedra triturada (mezcla 50/50)	-	2500 a 5000 MPa
- Piedra triturada	-	3000 a 6000 MPa
- Grava natural (IP < 10, CBR > 30)	-	2000 a 4000 MPa
- **Tiempo de procesamiento.** Cuando se trabaja con emulsiones asfálticas no se especifica un tiempo límite fuera del requerido para completar todo el procesamiento, la compactación y el terminado antes de que rompa la emulsión.
- **Densidad.** Para cada ensayo, normalmente se especifica una densidad (promedio) de mínimo el 98 % de la densidad AASHTO modificada. Como ya se describió para los materiales tratados con cemento, el término “promedio” se incluye algunas veces cuando se acepta una variación de densidad dentro de la capa. Cuando esto se permita, la densidad en el tercio inferior de la capa no debe ser menor en un 2 % del valor promedio especificado.

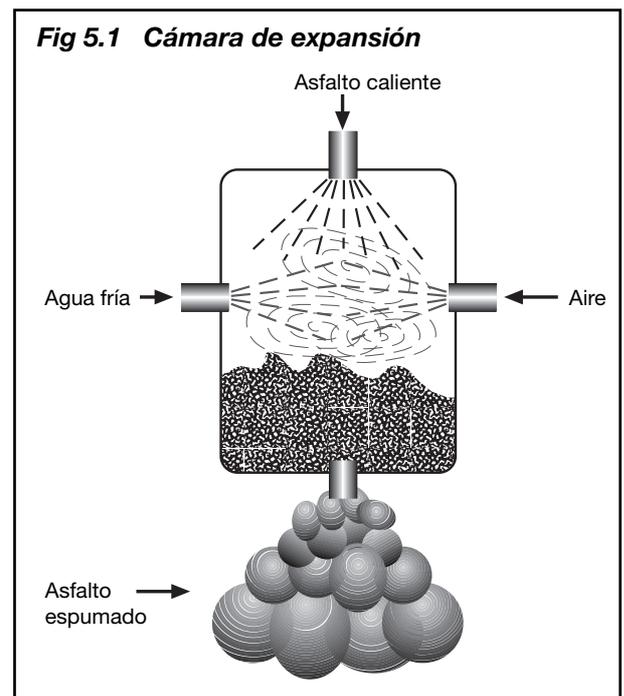
5.4 Estabilización con asfalto espumado

5.4.1 Generalidades

El espumado ocurre cuando se agrega una pequeña cantidad de agua al asfalto caliente, incrementando así el área superficial y reduciendo significativamente la viscosidad del asfalto. Esta forma de asfalto es adecuada para su mezcla con agregados fríos y húmedos. El uso potencial del asfalto espumado como ligante para mezclas en frío lo estableció el profesor Ladis Csanyi, de la Estación Experimental de Ingeniería de la Iowa State University, en 1956, quien utilizó un proceso de inyección de vapor para formar la espuma. Esta tecnología más tarde fue refinada por la organización Mobil Oil, que adquirió los derechos de la patente de la invención de Csanyi y desarrolló el primer sistema que mezclaba agua con asfalto para producir espuma. El sistema desarrollado por Wirtgen a mediados de los años noventa, inyecta tanto aire como agua en el asfalto en una cámara de expansión, como se muestra en la Figura 5.1.

El asfalto espumado puede usarse como agente estabilizador de una gran variedad de materiales: desde piedras trituradas de buena calidad hasta gravas marginales con una plasticidad relativamente alta. Sus principales ventajas frente a las emulsiones asfálticas, en los procesos de estabilización, son:

- Se reducen los costos de transporte debido a que la espuma de asfalto se fabrica a partir de asfaltos de penetración estándar y solamente un pequeño porcentaje de agua, por lo regular 2 % por masa de asfalto. Con el asfalto espumado no se incurre en otros costos de manufactura adicionales a la inversión inicial en los equipos.
- El material tratado con asfalto espumado puede colocarse, compactarse y abrirse al tráfico inmediatamente después del mezclado; y



- Los materiales tratados con asfalto espumado permanecen trabajables por largos períodos y pueden operarse en condiciones adversas de tiempo, sin presentarse el lavado del asfalto de los agregados.

De manera similar a las estabilizaciones con emulsión asfáltica, normalmente al material tratado con asfalto espumado se le agregan pequeñas cantidades de cemento o de cal; esto no sólo mejora la resistencia conservada sino que colabora con la dispersión del asfalto al incrementar la fracción inferior a 0,075 mm, como se describe más adelante.

5.4.2 Características del asfalto espumado

Los principales factores que afectan el uso de un asfalto espumado como agente estabilizador son:

- **Las propiedades de la espuma.** El asfalto espumado se caracteriza en términos de la relación de expansión y de la vida media. La relación de expansión se define como la relación entre el volumen máximo alcanzado en el estado de espuma y el volumen del asfalto sin espumar. La vida media corresponde al tiempo transcurrido, en segundos, que tarda la espuma en sedimentarse hasta la mitad del volumen máximo obtenido.

Las características de espumado de un asfalto específico están influenciadas por numerosos factores, siendo los más importantes los siguientes:

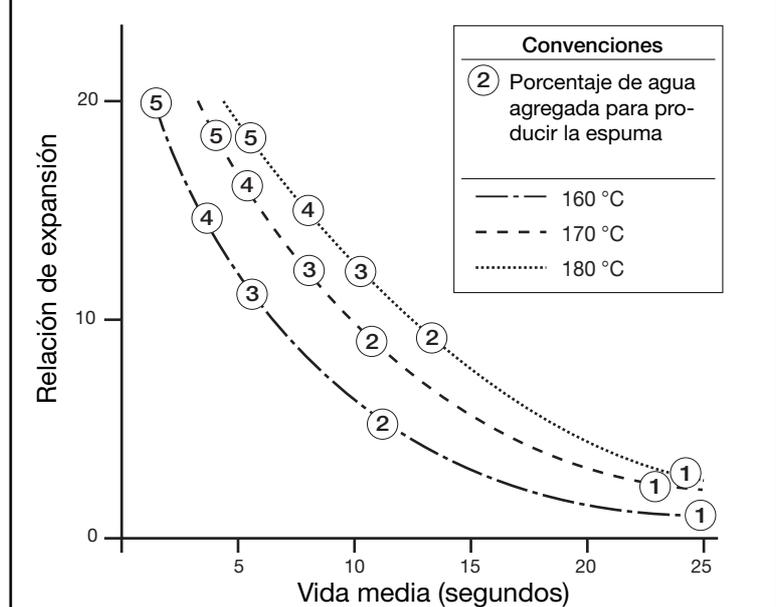
- La temperatura del asfalto. Las características de espumado de muchos asfaltos se mejoran con el aumento de la temperatura;
- La cantidad de agua agregada al asfalto. Generalmente, la relación de expansión se incrementa con el aumento en la cantidad de agua agregada, mientras que la vida media disminuye.
- La presión con la cual se inyecta el asfalto dentro de la cámara de expansión. Bajas presiones afectan negativamente la expansión y la vida media; y
- La presencia de agentes antiespumantes, tales como los compuestos de silicona.

Normalmente estas características se representan de manera gráfica, como se muestra en la Figura 5.2.

Generalmente se considera que la “mejor” espuma es aquella para la cual se optimizan la expansión y la vida media. En el ejemplo de la Figura 5.2 se muestra que con una temperatura superior a los 170°C y con un contenido de agua de cerca del 2,5 % se producirá una espuma con una relación de expansión de once y una vida media de nueve segundos. Las características de espumado corresponden más a órdenes de magnitud que a medidas exactas. De esta manera, la relación de expansión del ejemplo debe interpretarse como > 10, o entre 10 y 15. Igualmente, la vida media debe reportarse entre cinco y diez segundos.

En general, cuando mejores sean las características de espumado, mejor será la calidad de la mezcla resultante. Cuando se usa el asfalto espumado como agente estabilizador, no existen límites absolutos que gobiernen sus características. Altas relaciones de expansión obtenidas sacrificando la vida media, o viceversa, dan lugar a mezclas de mala calidad en comparación con la de las mezclas obtenidas cuando las dos características son óptimas. La calidad de la mezcla debe evaluarse sometiendo las probetas Marshall a ensayos de resistencia y no juzgarse únicamente mediante la inspección visual. Sin embargo, cuando las características de espumado son muy pobres (relación de expansión menor que cinco y vida media menor que cinco segundos) resulta difícil elaborar una mezcla aceptable. Por estos motivos han de considerarse el uso de asfaltos de diferentes fuentes o la adición de un agente promotor de espumado.

Fig 5.2 Características típicas de espumado



- **Grado y reología del asfalto.** Los asfaltos blandos regularmente poseen mejores características de espumado. La selección del tipo de asfalto que se va a usar (grado de penetración) está altamente influenciada por la temperatura ambiente. Para climas calientes se prefieren asfaltos duros (grado de penetración < 100). En este caso también puede considerarse el empleo de asfaltos blandos, verificando primero su comportamiento mediante ensayos comparativos de resistencia.

Adicionalmente, un excesivo contenido de asfaltenos en los asfaltos tiene una influencia negativa sobre las características de espumado, ya que mientras mayor es la proporción de asfaltenos, peores son las características de la espuma.

- **Dispersión del asfalto.** A diferencia de las mezclas asfálticas en caliente, los materiales estabilizados con asfalto espumado no son negros, debido a que las partículas gruesas del agregado no están cubiertas y usualmente están libres de asfalto. Cuando el asfalto espumado entra en contacto con el agregado, las burbujas estallan en millones de “partículas” diminutas que se dirigen y adhieren a las partículas finas, en especial a la fracción inferior a 0,075 mm. Esto da lugar a un llenante ligado con asfalto que actúa como un mortero entre las partículas gruesas. Después de su tratamiento, existe por tanto solamente un ligero oscurecimiento del color en el material.

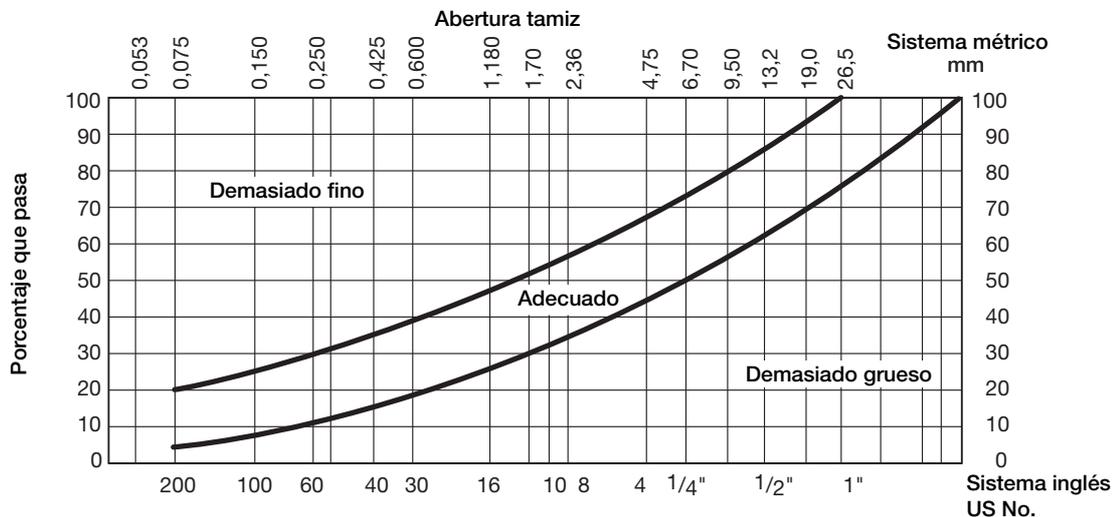
Particularmente cuando el material reciclado presenta deficiencia en la fracción fina (v.g., menos del 5 % pasa el tamiz de 0,075 mm), la adición de cemento, cal o de otros materiales finos (100 % pasa el tamiz de 0,075 mm) colabora con la dispersión del asfalto.

5.4.3 El trabajo con asfalto espumado

Cuando se trabaja con asfalto espumado, deben tenerse en cuenta los siguientes aspectos:

- **Aspectos de seguridad.** Para producir una espuma aceptable, se requieren altas temperaturas del asfalto (generalmente 170°C) para reaccionar con el agua. A tales temperaturas el asfalto es una sustancia letal y si no se maneja correctamente puede producir la muerte. Lo anterior es bien conocido por fabricantes de mezclas en caliente, quienes tienen que trabajar a diario con el asfalto caliente; sin embargo, los contratistas del reciclaje que desarrollan por primera vez un proyecto con asfalto espumado, deben asegurarse de que su personal reciba un entrenamiento apropiado.
- **Conveniencia de los materiales.** Un material con deficiencia de finos no mezclará bien con el asfalto espumado. Como se muestra en la Figura 5.3, el requerimiento mínimo es del 5 % de material inferior a 0,075 mm (pasa tamiz N° 200). Cuando los finos en un material son insuficientes, la espuma de asfalto no se dispersa de manera apropiada tendiendo a formar, a través del material reciclado, lo que se conoce como “grumos”, o aglomeraciones de los finos ricas en asfalto. Estos grumos varían en tamaño de acuerdo con la deficiencia de finos; una gran deficiencia dará lugar a muchos grumos de mayor tamaño que tenderán a actuar como un lubricante en la mezcla y conducirán a una reducción en la resistencia y en la estabilidad de la misma.

Fig 5.3 Materiales adecuados para tratarse con asfalto espumado



Ensayos simples de laboratorio, llevados a cabo sobre muestras representativas tomadas de la carretera existente, indicarán cualquier deficiencia potencial en el contenido de finos, pudiendo rectificar la gradación con material fino de importación que se esparcirá sobre la superficie antes de proceder al reciclaje. Los materiales cohesivos deben tratarse con cuidado, aun cuando la gradación del laboratorio indique un alto porcentaje de material que pasa el tamiz de 0,075 mm, ya que a menudo la calidad de la mezcla que se obtiene en el campo es pobre. Esto se debe a que la naturaleza cohesiva del material origina el aglutinamiento de las partículas finas, haciéndolo inaceptable para su tratamiento con asfalto espumado. Una comparación de los ensayos granulométricos, efectuados en el laboratorio, sobre el material lavado y sin lavar, indicará la posibilidad de que este problema se desarrolle. La gradación sin lavado es un buen indicador de la cantidad de finos disponibles.

Un material con deficiencia de finos puede mejorarse con la adición de cemento, cal o de otro material que posea un 100 %, pasando el tamiz de 0,075 mm. Con todo, debe evitarse el empleo de cemento en cantidades superiores al 2 % debido a su efecto negativo sobre las propiedades de fatiga de la capa estabilizada.

- **Consistencia del suministro de asfalto.** Cuando se acopla un nuevo carrotanque de asfalto a la máquina recicladora deben verificarse dos aspectos básicos, con el objeto de asegurarse de que éste es aceptable para el espumado.
 - La temperatura del asfalto dentro del tanque debe verificarse usando un termómetro calibrado (los medidores fijos en los tanques resultan notoriamente imprecisos).
 - La calidad de espumado debe verificarse usando para tal efecto la boquilla de ensayo de la máquina recicladora. Con el propósito de obtener una muestra completamente representativa, esta verificación debe esperar hasta que como mínimo hayan pasado a través de la barra de rociado cien litros de asfalto, mientras se está reciclando.
- **Flujo de asfalto.** Algunas veces el asfalto, que se despacha al sitio mediante carrotanques que tienen adaptado un tubo de calentamiento, se encuentra contaminado con pequeñas piezas de carbón que se forman sobre las paredes del tubo durante su calentamiento. Con el drenaje desde el tanque de las últimas toneladas de asfalto, estas partículas indeseables tienden a entrar en el sistema de la máquina recicladora y causar una posible obstrucción. Este problema se resuelve fácilmente asegurando la efectividad del filtro que se encuentra en la línea de suministro. Cualquier incremento inusual de la presión indicará que el filtro requiere limpieza, procedimiento que de todas formas debe llevarse a cabo a intervalos regulares (por ejemplo, al finalizar cada cambio de carrotanque de asfalto).
- **Aplicación de agentes estabilizadores cementantes junto con asfalto espumado.** Como ya se ha descrito, es común adicionar pequeñas cantidades de cemento o de otros agentes estabilizadores cementantes cuando se recicla con asfalto espumado. Debe tenerse cuidado cuando se mezcla el material con cemento, cal o con otro agente similar, realizando una pasada inicial. El proceso de cementación – que comienza tan pronto como el polvo seco entra en contacto con la humedad – tiende a ligar los finos, reduciendo efectivamente la fracción de 0,075 mm. La calidad de la mezcla cuando se incorpore el asfalto espumado será deficiente, a causa de la insuficiencia de finos disponibles para la dispersión de las partículas de asfalto.
- **Reprocesamiento de la capa terminada.** El material tratado con asfalto espumado puede reprocesarse sin afectar su resistencia última, siempre y cuando se asegure de que se mantenga el contenido de humedad aproximadamente en el mismo nivel en que se encontraba en el momento de la compactación. La anterior característica resulta benéfica cuando la vía tiene que abrirse de manera temprana al tráfico, aun cuando no se haya completado la terminación de los trabajos. El material puede reprocesarse al día siguiente (por lo general fresándolo primero) para luego hacer su terminado de manera apropiada. Sin embargo, si se permitió el secado, el reprocesamiento afectará negativamente la resistencia última del material.
- **Control de calidad.** Las muestras tomadas de la mezcla dejada atrás por la máquina recicladora no necesitan compactarse dentro de un tiempo específico, si son guardadas dentro de un recipiente sellado. Las probetas pueden elaborarse en una etapa posterior, e incluso, si es necesario, varios días después.

5.4.4 Criterios para las capas estabilizadas con asfalto espumado

A continuación se presentan las propiedades más importantes aplicables a los materiales estabilizados con asfalto espumado, las cuales se alcanzarán cuando la aplicación de la espuma de asfalto sea óptima, de acuerdo con el procedimiento de diseño de la mezcla. Adicionalmente a la incorporación de 1 a 2 % de cemento, la cantidad de asfalto por lo general se encuentra en el siguiente rango:

- Material fresado/piedra triturada (mezcla 50/50) – 1,5 a 3,0 %
 - Piedra triturada – 2,5 a 4,0 %
 - Grava natural (IP < 10, CBR > 30) – 3,0 a 4,5 %
- **Resistencia.** Los materiales estabilizados con asfalto normalmente se evalúan mediante la resistencia a la tracción indirecta (ITS) y no con los ensayos Marshall. El ensayo se realiza sobre probetas tipo Marshall, a una temperatura de 25°C y son típicos los siguientes valores de la ITS:
 - Material fresado/piedra triturada (mezcla 50/50) – 350 a 800 kPa
 - Piedra triturada – 400 a 900 kPa
 - Grava natural (IP < 10, CBR > 30) – 250 a 500 kPa
 - **Rigidez.** El módulo resiliente de un material estabilizado con asfalto se mide sometiendo la muestra a un ensayo con cargas repetitivas. Los valores típicos son:
 - Material fresado/piedra triturada (mezcla 50/50) – 2500 a 5000 MPa
 - Piedra triturada – 3000 a 6000 MPa
 - Grava natural (IP < 10, CBR > 30) – 2000 a 4000 MPa
 - **Tiempo de procesamiento.** No se tiene un límite específico de tiempo para los trabajos con asfalto espumado. El período de trabajo puede extenderse indefinidamente si se mantiene el contenido de humedad próximo al óptimo.
 - **Densidad.** Para cada ensayo, normalmente se especifica una densidad (promedio) de mínimo el 98 % de la densidad AASHTO modificada. Como ya se describió, el término “promedio” se incluye algunas veces cuando se acepta una variación de densidad dentro de la capa. Cuando esto se permita, la densidad en el tercio inferior de la capa no debe ser menor en un 2 % del valor promedio especificado.

5.5 Resumen – El cemento y los agentes estabilizadores asfálticos

Esta última sección se incluye como un resumen de los pros y los contras de cada uno de los tres agentes estabilizadores comúnmente usados, junto con sus respectivas propiedades.

5.5.1 Comparación entre las estabilizaciones con cemento y con asfalto

CEMENTO	
Ventajas	Desventajas
<p>Disponibilidad: El cemento puede obtenerse en cualquier parte del mundo tanto en sacos como a granel.</p> <p>Costo: En relación con el asfalto, el cemento es mucho mas barato.</p> <p>Facilidad de aplicación: En ausencia de esparcidores o de mezcladores de lechada, el cemento siempre puede extenderse manualmente.</p> <p>Aceptación: El cemento es bien conocido en la industria de la construcción. Usualmente se encuentran disponibles métodos estándar de ensayo y especificaciones.</p> <p>Mejora significativamente las propiedades de resistencia a la compresión de muchos materiales.</p> <p>Mejora la resistencia del material a la acción del agua.</p>	<p>El agrietamiento por contracción es inevitable pero puede minimizarse.</p> <p>Incrementa la rigidez, con la consecuente reducción en las características de fatiga.</p> <p>Requiere un curado apropiado. El tráfico temprano puede dañar la superficie.</p>

EMULSIÓN ASFÁLTICA	
Ventajas	Desventajas
<p>Pavimento flexible: La estabilización con asfalto da lugar a un material visco-elástico, con propiedades superiores a la fatiga.</p> <p>Facilidad de aplicación: La recicladora se acopla al carro tanque de emulsión para su aplicación a través de una barra irrigadora.</p> <p>Aceptación: Las emulsiones asfálticas son relativamente bien conocidas en la industria de la construcción. Generalmente están disponibles métodos estándar de ensayo y especificaciones.</p>	<p>Costo: Las emulsiones asfálticas normalmente no se fabrican en el sitio. El proceso requiere un control de calidad estricto. Los agentes emulsificantes son costosos. Se transporta agua y no solamente asfalto.</p> <p>Algunas veces el contenido de humedad de los materiales existentes en el pavimento es demasiado elevado y al añadir la emulsión puede alcanzar la saturación.</p> <p>El curado puede tomar mucho tiempo. El desarrollo de la resistencia está regido por las pérdidas de humedad.</p> <p>Disponibilidad: Es posible que no se obtenga la formulación necesaria para los trabajos de reciclaje.</p>

ASFALTO ESPUMADO	
Ventajas	Desventajas
<p>Facilidad de aplicación: Al igual que con las emulsiones asfálticas, se aplica a través de una barra irrigadora especial después del acoplamiento al carrotanque de suministro.</p> <p>Pavimento flexible y fuerte: Los materiales tratados con asfaltos espumados poseen un mortero flexible que liga las partículas gruesas. Por tanto, exhibe una resistencia superior tanto a la deformación como a la fatiga.</p> <p>Costo: Para el asfalto espumado se usa un cemento asfáltico estándar de penetración. No existen costos de manufactura.</p> <p>Velocidad de ganancia de resistencia: El material puede abrirse al tráfico inmediatamente después de su colocación.</p>	<p>El espumado demanda que el cemento asfáltico se encuentre caliente, por lo regular a 170°C, lo cual requiere sistemas de calentamiento y precauciones de seguridad.</p> <p>Calidad del asfalto: La calidad del material estabilizado está determinada por las características de la espuma, las cuales a su vez son dependientes de la calidad del asfalto.</p> <p>Tipo de material y condición: Materiales saturados o con deficiencia de finos no pueden tratarse con asfalto espumado.</p>

5.5.2 Características de desempeño

En las siguientes tablas se resumen las propiedades de los tres materiales comúnmente encontrados en los proyectos de reciclaje, estabilizados sólo con cemento o con la combinación de cemento y asfalto, ya sea como emulsión o como espuma.

Material fresado/PIEDRA TRITURADA (Mezcla 50/50)			
Parámetro de ensayo	Estabilizado con cemento 2 - 2½ % de cemento	Estabilizado con asfalto	
		1 - 1½ % de cemento + 2½ - 5 % de emulsión	1 % de cemento + 1½ - 3 % de espuma
Densidad (% AASHTO modificado)	96 a 98	98 a 100	98 a 102
Resistencia compresión inconfiada (MPa)	1,5 a 3,0	n/a	n/a
Resistencia tracción indirecta (ITS) (kPa)	n/a	350 a 750	350 a 800
Resistencia conservada (%)	n/a	> 75	> 75
Módulo resiliente (MPa)	~ 5000 (preagrietamiento)	2500 a 5000	2500 a 5000

PIEDRA TRITURADA (Tamaño máximo 53 mm, índice plástico < 6, CBR > 80)			
Parámetro de ensayo	Estabilizado con cemento 2 - 3 % de cemento	Estabilizado con asfalto	
		1 - 1½ % de cemento + 3½ - 6 % de emulsión	1 % de cemento + 1½ - 3 % de espuma
Densidad (% AASHTO modificado)	96 a 98	98 a 100	98 a 102
Resistencia compresión inconfiada (MPa)	1,5 a 3,0	n/a	n/a
Resistencia tracción indirecta (ITS) (kPa)	n/a	400 a 800	400 to 900
Resistencia conservada (%)	n/a	> 60	> 60
Módulo resiliente (MPa)	~ 5000 (preagrietamiento)	3000 a 6000	3000 a 6000

GRAVA NATURAL (índice plástico < 10, CBR ~ 30)			
Parámetro de ensayo	Estabilizado con cemento 3 - 4% de cemento	Estabilizado con asfalto	
		1 - 1½ % de cemento + 4 - 7 % de espuma	1% de cemento + 1½ - 3% de espuma
Densidad (% AASHTO modificado)	95 a 97	97 a 100	98 a 100
Resistencia compresión inconfiada (MPa)	1,5 a 3,0	n/a	n/a
Resistencia tracción indirecta (ITS) (kPa)	n/a	250 a 500	250 a 500
Resistencia conservada (%)	n/a	> 50	> 50
Módulo resiliente (MPa)	~ 4000 (preagrietamiento)	2000 a 4000	2000 a 4000

Lista de referencias

- AASHTO guide for design of pavement structures.** 1993. Washington D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- A guide to the structural design of bitumen-surfaced roads in tropical and sub-tropical countries.** 1993. 4th Edition. Crowthorne, Berkshire: Transport Research Laboratory (TRL). (Overseas road note 31).
- Claessen, A.I.M, and Ditmarch, R. **Pavement evaluation and overlay design.** The Shell Method. Proceedings of the Fourth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements. Vol.1, Ann Arbor, 1977.
- Claessen, A.I.M and Valkering, C.O. and Ditmarch, R. **Pavement evaluation with the falling weight deflectometer.** Proceedings of the AAPT, Vol 46, New Orleans, 1976.
- Claessen, A.I.M. and Ditmarch, R. Presentation and discussion of the paper. **Pavement evaluation and overlay design.** The Shell Method. Proceedings of the Fourth International Conference on the Structural Design of Asphalt pavements. Vol. 2 Ann Arbor, 1977.
- De Beer, M., Kleyn, E.G., & Savage, P.F. **Advances in pavement evaluation and overlay design with the aid of the Dynamic Cone Penetrometer.** (NITRR report; RR 648). In: Proceedings of the International symposium on pavement evaluation and overlay design, 2nd, Rio de Janeiro, Brazil, 1989.
- De Beer, M. & Grobler, J.A. **Towards improved structural design criteria for Granular Emulsion Mixes (GEMs).** In: Conference on asphalt pavements for Southern Africa, Cape Town, South Africa, (CAP-SA), 6th, October 1994. Proceedings Vol 1. Session III: Innovation in design and construction.
- De Beer, M. **Developments in the failure criteria of the South African mechanistic design procedure for asphalt pavements.** In: Proceedings of the International conference on asphalt pavements (ISAP), 7th: Volume Three: Design and performance, University of Nottingham, Nottingham, UK, August 1992.
- De Beer, M. 1990. **Aspects of the design and behaviour of road structures incorporating lightly cementitious layers.** Ph.D dissertation, University of Pretoria, Pretoria.
- De Beer, M. 1991. **Use of the Dynamic Cone Penetrometer (DCP) in the design of road structures.** In: Proceedings of the Regional conference for Africa on soil mechanics and foundation engineering, 10th and the International conference on tropical and residual soils, 3rd, Maseru, September 1991.
- De Beer, M. 1985. **Behaviour of cementitious subbases in bitumen base road structures.** M.Eng Thesis, University of Pretoria, Pretoria.
- Flexible pavement rehabilitation investigation and design.** 1996. Pretoria: Committee of State Road Authorities (CSRA), Department of Transport (DoT). (DoT technical recommendations for highways; draft TRH12).
- Freeme, C.R. **Evaluation of pavement behaviour for major rehabilitation of roads.** NITRR Technical Report PR/19/83, Pretoria, CSIR, 1983.
- Freeme, C. R., Maree, J.H. and Viljoen, A.W. 1982. **Mechanistic design of asphalt pavements and verification using the Heavy Vehicle Simulator.** In: International conference on the structural design of asphalt pavements, 5th, Delft, Holland.
- GEMS - The design and use of granular emulsion mixes.** 1993. Cape Town. South African Bitumen and Tar Association (SABITA). (SABITA; manual 14).
- Guidelines for road construction materials.** 1985. Pretoria Committee of State Road Authorities (CSRA), Department of Transport (DoT). (DoT technical recommendations for highways; draft TRH14).
- Horak, E. **Aspects of deflection basin parameters used in mechanistic rehabilitation design procedures for flexible pavement in South Africa.** PhD Thesis, University of Pretoria, Pretoria, 1988.
- Jooste, J.P. **The measurement of deflection and curvature of road surfaces.** CSIR Manual K16, National Institute for Road Research, CSIR, Pretoria, 1970.
- Jordaan, G.J., **An assessment of the TRRL surface deflection method for pavement rehabilitation design.** DRTT Research Report DVPT 54, CSIR, Pretoria, 1989.

Jordaan, G.J. and VAN AS, S.C. **Pavement evaluation: testing frequency requirements for deflection bowl parameters.** Proceedings of the Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA 94), Cape Town, South Africa, 1994.

Jordaan, G.J. **Towards improved procedures for the mechanistic analysis of cement-treated layers in pavements.** Proceedings of the 7th International Conference on Asphalt Pavements, Nottingham, England, 1992.

Jordaan, G.J. **The classification of pavement rehabilitation design methods.** DRTT Research Report DPVT5, CSIR, Pretoria, 1988.

Jordaan, G.J. **Guidelines towards the use of the Asphalt Institutes method for pavement rehabilitation design.** DRTT Research Report DPVT 55, CSIR, Pretoria, 1989.

Jordaan, G.J. **Guidelines towards the use of a rehabilitation design methods based on dynamic cone penetrometer (DCP) measurements as developed in South Africa.** DRTT Research Report DPVT 43, CSIR, Pretoria, 1989.

Jordaan, G.J. **An assessment of the South African (SA) mechanistic pavement rehabilitation design method based on the linear elasticity theory.** DRTT Research Report DPVT 69, CSIR, Pretoria, 1990.

Jordaan, G.J. **Pavement rehabilitation design based on maximum surface deflection measurements.** Research Report 91/243. Department of Transport, Pretoria, 1994.

Jordaan, G.J. **Pavement rehabilitation design based on pavement layer component tests (CBR and DCP).** Research Report 91/241, Department of Transport, Pretoria, 1994.

Jordaan, G.J. **The South African mechanistic pavement rehabilitation design method.** Research Report 91/242, Department of Transport, Pretoria, 1994.

Jordaan, G.J., Servas, V.P. and Marais, C.P. **The effective use of non-destructive testing methods in pavement rehabilitation design.** Proceedings of the 1986 Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields, Plymouth, England, 1986.

Kennedy C.K and Lister, N.W. **Prediction of pavement performance and design overlays.** TRRL Laboratory Report 833, Crowthorn Berkshire, TRRL, 1978.

Kennedy, C.K. **Pavement deflection: operating procedures for use in the United Kingdom.** TRRL Laboratory Report 835, TRRL, Crowthorn. 1978.

Kennedy, C.K. Fevre, P and Clarke, C.S. **Pavement deflection equipment for measurement in the United Kingdom.** TRRL Laboratory Report 834, Berkshire, 1978.

Kleyn, E. G. 1982. **Aspects of pavement evaluation and design as determined with the aid of the Dynamic Cone Penetrometer (DCP).** M.Eng. Thesis (In Afrikaans), University of Pretoria, Pretoria.

Kleyn, E.G., Maree, J.H. and Savage, P. F. **The application of a portable dynamic cone penetrometer to determine in situ bearing properties of road pavement layers and subgrades in South Africa.** Proceedings of the Second European Symposium on Penetration Testing. The Netherlands, 1982.

Kleyn, E.G., Van Heerden, M.J.J. and Rossouw, A.J. **An investigation to determine the structural capacity and rehabilitation utilization of a road pavement using the pavement Dynamic Cone Penetrometer.** Proceedings of the International Symposium on Bearing Capacity of Roads and Airfields. Trondheim, Norway, 1982.

Kleyn, E.G. and Van Heerden, M.J.J. **Using DCP soundings to optimize pavement rehabilitation.** Proceedings of the 1983 Annual Transportation Convention. Johannesburg.

Kleyn, E.G. and Savage, P.F. **The application of the pavement DCP to determine the bearing properties and performance of road pavements.** Proceedings of the International Symposium on Bearing Capacity of Roads and Airfields. Trondheim, Norway, 1982.

Koole, R.C. **Overlay design based on falling weight deflectometer measurements. Pavement evaluation and overlay design.** A Symposium and related papers. Transportation Research Record 700, TR5, National Academy of Sciences, Washington, DC, 1979, pp 59-72.

Lacante, S.C. and De Beer, M. **Deflection basin analysis.** Project Report 88/025, Department of Transport, Pretoria, 1991.

Lister, N.W. **Deflection criteria for flexible pavements.** TRRL Laboratory Report 375, TRRL, Crowthorn, 1972.

Loudon, A A & Partners. **Cold deep in place recycling: Technical Recommendations and Application Specification,** Publication 1995, ISBN 0620-19413-8, South Africa.

Maree, J.H. **Structural classification of pavement structures using measured deflection bowl parameters. The IDMP program.** Scott & de Waal Inc, Sandton 1990.

Norman, P.J. Snowdon, R.A. and Jacobs, J.C. **Pavement deflection measurements and their application to structural maintenance and overlay design.** TRRL Report LR 571, Berkshire, 1973.

Standard nomenclature and methods for describing the condition of asphalt pavements. 1985. Pretoria: Committee of State Road Authorities (CSRA), Department of Transport (DoT). (DoT technical recommendations for highways; TRH6).

The Asphalt Institute. **Asphalt overlays and pavement rehabilitation.** Asphalt Institute Manual (MS-17), USA, 1969.

R.N. Walker, W.D.O. Patterson, C.R. Freeme, and C P. Marais. **The South African mechanistic design procedure.** In: Proceedings of the 4th International conference on the structural design of asphalt pavements, 4th, Ann Arbor, Michigan, August, 1977; Vol. 2.

Theyse, H.L., De Beer, M. & Rust, F.C. 1996. **Overview of the South African mechanistic design analysis method.** In: Transportation Research Board (TRB) meeting. 75th, January 7 11, 1996. (Paper accepted for publication).

Apéndices

Apéndice No.		Página
1	Ejemplos de metodologías de diseño de pavimentos para el reciclaje en frío	85
2	Procedimientos para el diseño de mezclas	107
3	Otros equipos necesarios para el procesamiento de material reciclado	127
4	Especificaciones estándar para el reciclaje en frío in situ	135
5	Análisis de costos	151

Apéndice 1

Ejemplos de metodologías de diseño de pavimentos para reciclaje en frío

A1.1	Reciclaje profundo	87
A1.2	Reciclaje superficial o de capas delgadas	98
A1.3	Mejoramiento de vías en grava no pavimentadas	102

En esta sección se tratan las metodologías aplicables a cada una de las categorías de reciclaje, y se explican las aplicaciones típicas mediante ejemplos simplificados. La selección final de la opción de diseño de pavimento más efectiva, desde el punto de vista de costo, se basa en comparaciones entre varias opciones. Estos ejemplos siguen los gráficos, para cada categoría de reciclaje, que se presentan en el Capítulo 3. Los detalles de los costos y una explicación de varios de los análisis se incluyen en el Apéndice 5.

A1.1 Reciclaje profundo

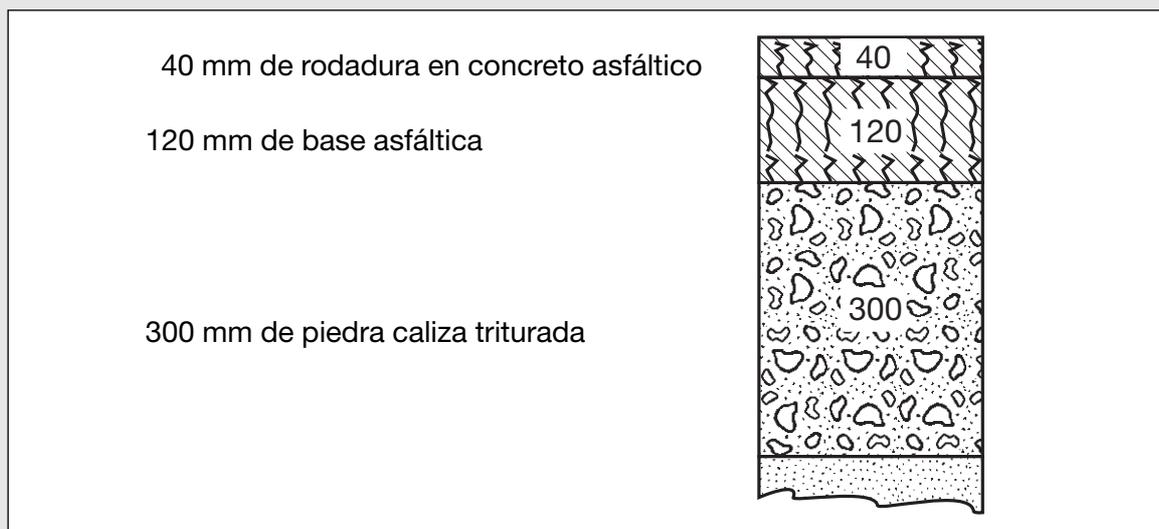
PASO 1 *Determinación de los requerimientos del propietario de la vía*

El primer paso en el proceso del diseño de una rehabilitación es determinar, junto con el propietario de la vía, los siguientes aspectos:

- El período de diseño que requiere el pavimento rehabilitado antes de necesitarse cualquier refuerzo.
- El nivel de mantenimiento que el propietario de la vía considera que debe llevarse a cabo durante el período de diseño de la vía.
- Los estándares de funcionamiento requeridos del pavimento reciclado, tales como el índice de servicio.
- La información sobre el tráfico.
- La información disponible del pavimento.
- El tipo y posición de los servicios que pueden afectarse por la construcción.
- Los problemas prácticos en la construcción, por ejemplo la acomodación del tráfico y el control del mismo, durante el período de investigación.

PASO 2 *Recolección de la información disponible*

La información debe tomarse del sistema de administración del pavimento que posea el propietario de la vía, así como de otros registros. Un ejemplo típico de la construcción original de un pavimento sería el siguiente:



PASO 3 *Información del tráfico*

Para calcular el tráfico de diseño, debe recolectarse toda la información posible.

En el siguiente ejemplo se muestra cómo puede usarse la fórmula dada en el Capítulo 1, Sección 1.3.3, con el fin de determinar el tráfico de diseño para un proyecto.

Tabla A1.1 Cálculo del tráfico de diseño

ÍTEM	Descripción	Valor
1	Tráfico promedio diario anual (AADT)	5000
2	Porcentaje de vehículos pesados (H)	20
3	Cargas promedio por eje equivalente / vehículo pesado (E.E.)	1,8
4	Tasa esperada de crecimiento del tráfico (i, porcentaje)	4
5	Período de diseño (y, en años)	10
6	Factor de crecimiento de tráfico (f _y), calculado usando la Fórmula 1.2 (página 17), o tomado de la Tabla 1.3 (página 18)	4557
7	Tráfico de diseño en E.E. Calculado usando la Fórmula 1.1 (Ítem 1 x $\frac{\text{Ítem 2}}{100}$ x Ítem 3 x Ítem 6)	$8,2 \times 10^6$ (Tráfico Clase T3) *

* ref. Tabla 3.3, página 41

PASO 4 Investigación del pavimento

Como se discutió en la Sección 3.4, el rango completo de métodos de investigación se usa normalmente para proyectos en los que se considera el reciclaje profundo. A continuación se discuten algunos ejemplos típicos.

- **Investigación visual**

Las fallas identificadas visualmente deben registrarse en detalle para analizarse posteriormente, desde el punto de vista de los porcentajes de la longitud de vía afectada por los diferentes tipos de falla, tal como se ilustra en el ejemplo de la Tabla A.1.2.

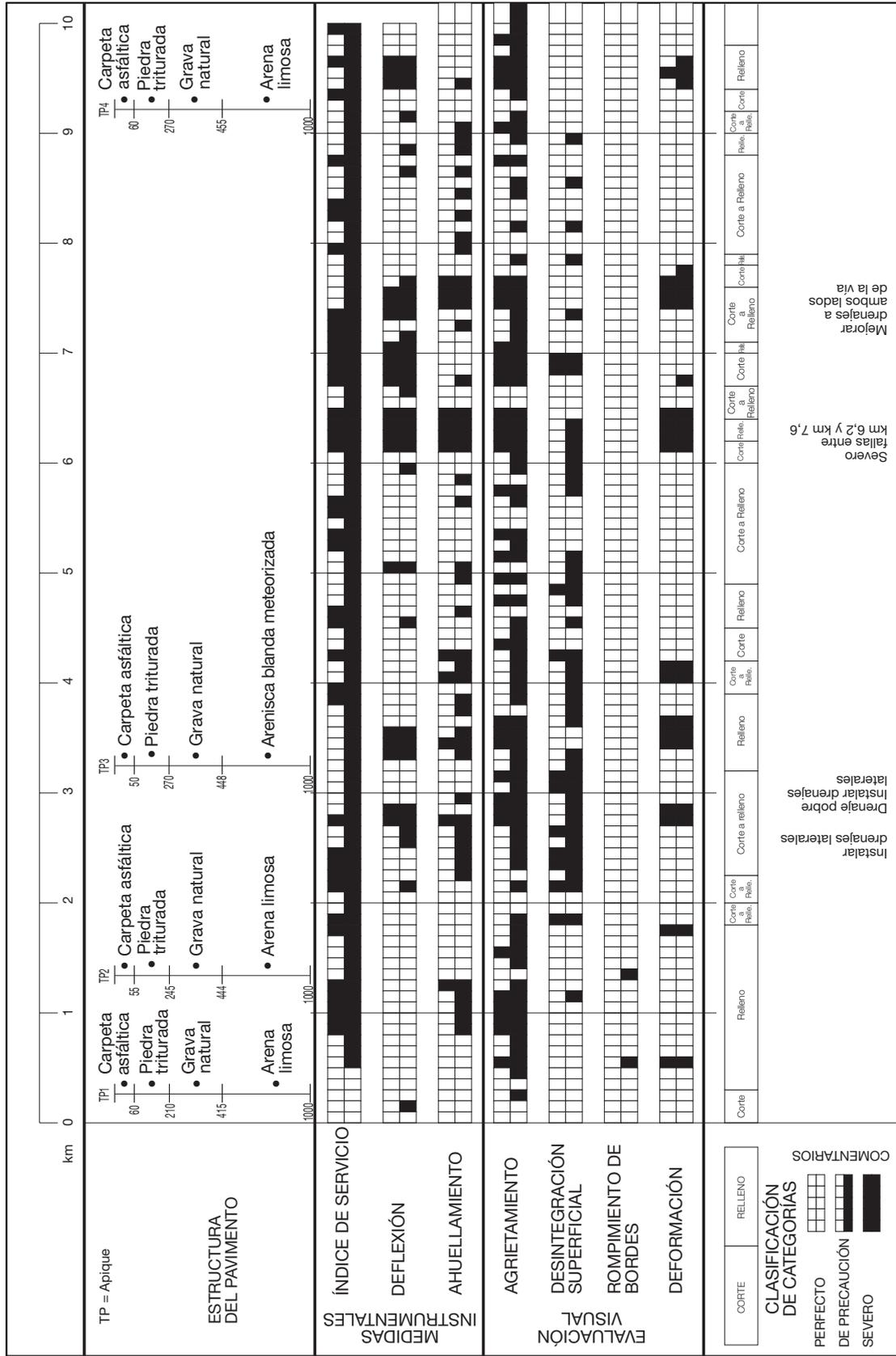
En este ejemplo puede observarse que la vía clasifica en la categoría de falla “severa” si hay fisuras y en la zona de “precaución” cuando existen deformación y desgaste de la superficie.

La inspección visual ofrece también la oportunidad de observar problemas relacionados con el drenaje, restricciones de altura bajo estructuras, e inestabilidad causada por rellenos con mucha pendiente. Los resultados de una inspección visual detallada pueden combinarse con otros parámetros en un diagrama compuesto, tal como se muestra en la Figura A1.1. Este tipo de presentación permite obtener una impresión general de la condición del pavimento que va a mejorarse.

Tabla A1.2 Análisis visual de fallas

Modo de falla	% de longitud de vía sobre ancho total de vía que exhibe fallas severas	Criterio de comportamiento para cada modo de falla (% de la longitud de vía)		
		Intacto	Precaución	Severo
Agrietamiento	18	< 5	5 a 15	> 15
Deformación	14	< 5	5 a 15	> 15
Desintegración	3	< 10	10 a 15	> 15
Desgaste de la superficie	35	< 20	20 a 40	> 40

Fig A.1.1 Evaluación del pavimento



• **Muestras de apiques y núcleos**

El número de apiques que debe excavarse para obtener la información de la estructura del pavimento existente depende, en gran parte, de la cantidad de información disponible en los registros existentes de construcción, así como de la variabilidad de los materiales encontrados en el pavimento. Los apiques son esenciales para la investigación in situ de la estructura del pavimento y para obtener muestras de gran tamaño que se utilizarán en ensayos de laboratorio. Al examinar cuidadosamente el perfil del apique, puede obtenerse información valiosa acerca de las características in situ de los materiales encontrados en cada capa del pavimento y determinarse los espesores exactos de cada capa. En la Figura A1.2 se muestra un ejemplo del perfil de un apique.

Fig A1.2 Perfil de apiques

Leyenda suelo	Prof. (mm)	DESCRIPCIÓN DEL SUELO						Muestras
		Color	Consistencia	Condición de humedad	Estructura	Tipo de suelo	Origen	
	50	Rodadura asfáltica			Severamente fisurada			2 bolsas gds.
	140	Base asfáltica						4 bolsas gds. (~ 80 kg)
	310	Gris claro café	Suelta	Ligeramente húmeda	Fragmentada	Triturado arenisca cuarcítica	Importado	3 bolsas gds. (~ 70 kg)
	550	Café oscuro	Medianamente densa	Ligeramente húmeda	Intacta	Grava natural, arenisca meteorizada	Importado	3 bolsas gds. (~ 70 kg)
	1000	Gris café oscuro	Densa	Húmedo	Fisurada	Arena arcillosa, arenisca altamente meteorizada	Residual	3 bolsas gds. (~ 70 kg)

De cada apique debe tomarse suficiente material para realizar ensayos de laboratorio, con los que pueda determinarse la calidad de los materiales en cada capa y en la subrasante, y llevar a cabo diseños de mezcla con agentes estabilizadores.

En situaciones de tráfico muy pesado, el número de apiques debe reducirse al mínimo requerido para obtener información suficiente de la estructura del pavimento y para que el diseño de la rehabilitación sea confiable. En este caso deben analizarse cuidadosamente los núcleos, los cuales pueden tomarse rápidamente con una menor interrupción del tráfico.

Los resultados de los ensayos hechos sobre muestras tomadas de los apiques tienen que consignarse como se muestra en la Tabla A1.3. Los núcleos deben tomarse para complementar los resultados de los apiques (en este ejemplo, los núcleos se usan para verificar el espesor de las capas asfálticas).

Tabla A1.3 Resumen de resultados de un apique

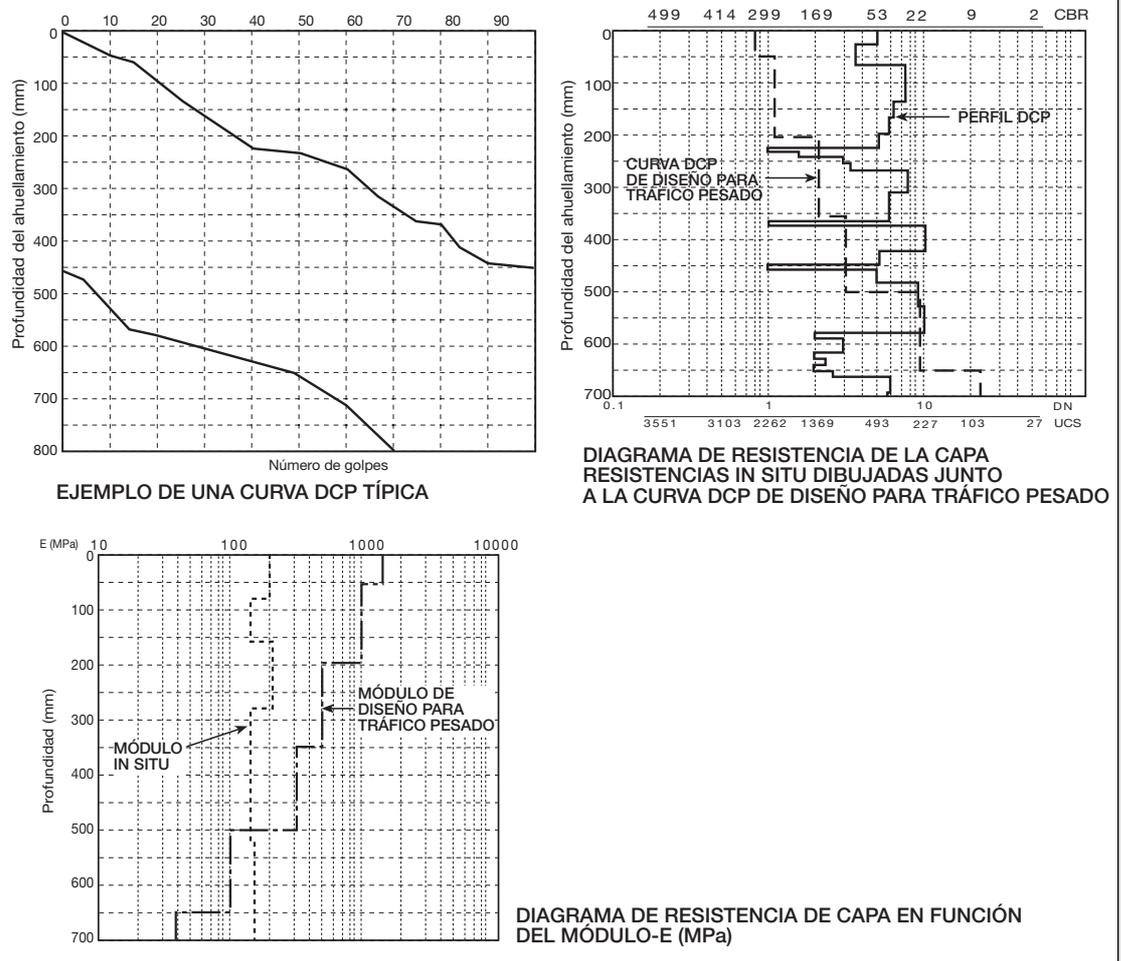
Apique N°	Descripción	Profundidad (mm)	Contenido de humedad natural (%)	Contenido de humedad óptimo (%)	CBR	Plasticidad
1	Carpeta asfáltica	150	–	–	–	–
	Piedra caliza triturada	300	4,5	6,0	85	6
	Arcilla arenosa	> 540	13,8	14,2	9	12
2	Carpeta asfáltica	160	–	–	–	–
	Piedra caliza triturada	290	5,2	6,3	95	7
	Arcilla arenosa	> 540	15,3	14,5	7	16

Los espesores de las capas, junto con los módulos elásticos derivados de los valores de CBR, la gradación y el índice de plasticidad, pueden emplearse en el diseño racional, mientras que los resultados de los contenidos de humedad son susceptibles de utilizarse para determinar si el pavimento sufre problemas relacionados con la humedad. En el ejemplo anterior, el contenido de humedad ligeramente alto en la subrasante del apique N° 2 contrasta con los de las otras capas, los cuales son menores que sus respectivos contenidos de humedad óptimos, lo que indica que las fallas no pueden atribuirse a altos contenidos de humedad.

• **Ensayos con el penetrómetro dinámico de cono**

El DCP es una herramienta útil y relativamente barata para analizar estructuras de pavimento. Un aspecto que debe tenerse en cuenta es que no resulta práctico trabajar con el DCP en estructuras con capas asfálticas gruesas o en materiales fuertemente cementados. Si el espesor de las capas asfálticas de una estructura de pavimento es superior a 30 mm, se recomienda realizar el ensayo DCP en el apique, una vez que se hayan removido las capas asfálticas, o perforar a través de dichas capas antes de hacer la penetración. Obviamente, es poco aconsejable efectuar penetraciones si se ha usado agua como un refrigerante durante la operación de perforación, ya que la humedad afecta los resultados. Si las penetraciones con el DCP comienzan después de remover las capas asfálticas, debe tomarse en cuenta su espesor en el análisis de resultados. Esto normalmente se realiza, asignando una tasa de penetración de 1 mm por golpe para todo el espesor de la carpeta asfáltica.

Fig A1.3 Sección de una impresión típica de computador

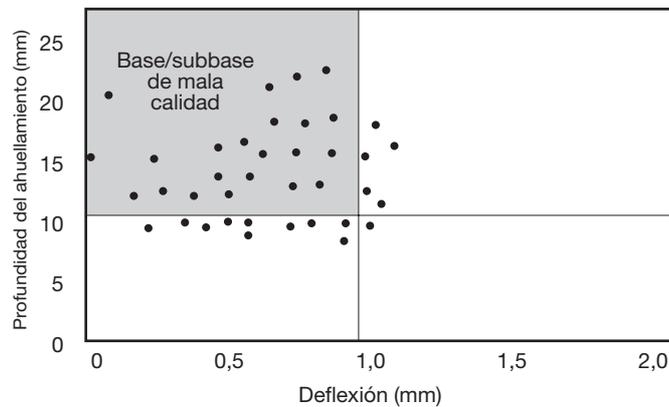


Es conveniente realizar el análisis de los resultados del ensayo DCP con programas de computador apropiados. Un ejemplo de la impresión de resultados es la Figura A1.3, en la que se muestra una curva típica del DCP en que la tasa de penetración se representa en un gráfico de golpes contra profundidad. También se muestra el diagrama de resistencia de las capas, que permite estimar los valores del CBR in situ y la resistencia a la compresión confinada de varias capas del pavimento y de su subrasante. El perfil DCP se dibuja junto con la curva de diseño DCP para varios niveles de carga de tráfico – en este ejemplo, para tráfico pesado. Si el perfil DCP queda a la derecha de la curva de diseño, la resistencia, de esta porción del pavimento es inadecuada. En este ejemplo, los 200 mm superiores del pavimento presentan una resistencia inadecuada. El programa también estima el módulo elástico de los materiales in situ y hace un gráfico de módulo contra la profundidad del pavimento.

• **Medida de la profundidad del ahuellamiento**

Con el propósito de identificar la posición de las debilidades dentro de una estructura del pavimento, deben graficarse las medidas de las profundidades de ahuellamiento contra las medidas de deflexión de la superficie, tal como se muestra en la Figura A1.4. En este ejemplo, la correlación indica que hay debilidades en las capas superiores del pavimento. El ancho del ahuellamiento es un indicador útil: anchos importantes indican fallas profundas en el pavimento, mientras que si son relativamente angostos las fallas se localizan en las capas superiores.

Fig A1.4 Ejemplo de un gráfico de datos de deflexión – profundidad de ahuellamiento



• **Medidas de deflexiones**

Las medidas de las deflexiones de la superficie pueden compararse con el criterio de comportamiento. Un análisis de la deflexión al percentil 95, en el ejemplo simplificado de la Tabla A1.4, muestra que la vía se encuentra dentro de la categoría de falla “severa”, lo que indica que el pavimento existente es inadecuado para soportar tráfico pesado y, por tanto, requiere un refuerzo.

Hay que anotar que este criterio de comportamiento varía significativamente, dependiendo del tipo de pavimento, y debe tomarse únicamente como ejemplo de cómo pueden utilizarse los resultados de la deflexión.

Tabla A1.4 Análisis de la deflexión de la superficie

Deflexión de la superficie, al percentil 95 (micras)	Criterio de deflexión de la superficie		
	Intacto	Precaución	Severo
700	< 200	200 - 600	> 600

Las deflexiones de la superficie se usan en conjunto con métodos de diseño de pavimentos como los desarrollados por el Instituto del Asfalto y el TRRL, los cuales resultan útiles en la determinación de la vida residual del pavimento. También se aplican para estimar los espesores de las capas asfálticas para el tráfico de diseño, pero no son fácilmente adaptables al diseño de pavimentos para procesos de reciclaje profundo.

Las medidas de la cuenca de deflexiones pueden usarse para calcular varios parámetros y compararlos con el criterio de comportamiento, como el mostrado en la Tabla A1.5, para pavimentos asfálticos que soportan tráfico pesado.

Tabla A1.5: Análisis de la cuenca de deflexiones

Parámetros de la cuenca de deflexión	Límites típicos (micras)	Resultados típicos
Índice de curvatura de la superficie	50 a 70	75
Índice de daño en la base	25 a 40	35
Índice de curvatura en la base	10 a 15	13

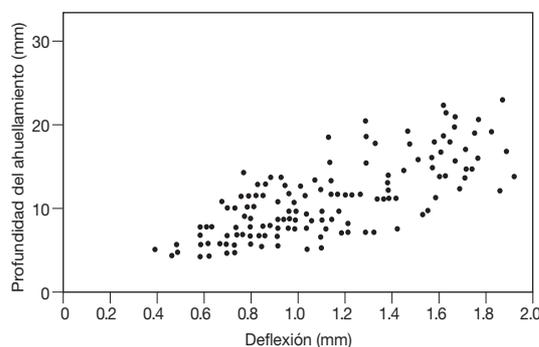
El índice de curvatura de la superficie refleja la rigidez relativa de la porción superior del pavimento (generalmente de las capas asfálticas), mientras que el índice de daño en la base y el índice de curvatura en la base muestran una rigidez relativa de los materiales de las capas inferiores del pavimento. En este ejemplo, el alto índice de curvatura de la superficie señala una debilidad en las capas superiores.

Cuando se analizan pavimentos en los que se considera el reciclaje, otra aplicación de las medidas de las cuencas de deflexión es la determinación, por retrocálculo, del módulo elástico. El valor del módulo puede utilizarse para el diseño racional en la modelación del pavimento existente, así como para analizar el efecto del reciclaje de la porción superior del pavimento.

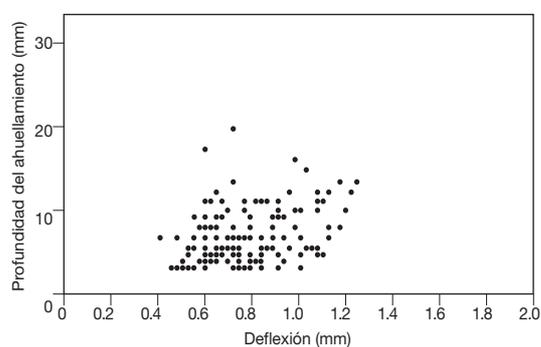
Para localizar las debilidades en un pavimento, un método que puede utilizarse es la correlación de las deflexiones de la superficie con las profundidades de ahuellamiento. En la Figura A1.5 a) se muestra que existe alguna correlación entre la deflexión y la profundidad del ahuellamiento, pues se presenta un incremento general de esta última con un aumento de la deflexión, lo que es un indicio de la debilidad de la subrasante. Sin embargo, en la Figura A1.5 b) no es evidente la correlación entre profundidad del ahuellamiento y la deflexión, lo que señala una debilidad en las capas superiores del pavimento.

Fig A1.5

a) Buena correlación entre la deflexión y la profundidad del ahuellamiento



b) Mala correlación entre la deflexión y la profundidad del ahuellamiento



PASO 5 *Determinación del comportamiento del pavimento*

El siguiente paso consiste en correlacionar lo encontrado en la investigación y utilizarlo para identificar y definir las causas de la falla del pavimento. A menudo es útil comparar los resultados de varias investigaciones y métodos de diseño. En esta etapa deben establecerse los trabajos adicionales que se requieren para entender completamente el comportamiento del pavimento. Por ejemplo, si los resultados encontrados son muy variables, habrá que realizar apiques y ensayos DCP adicionales.

En los métodos de diseño del Instituto del Asfalto y del TRRL se utilizan las medidas de deflexión de la superficie para determinar si la capacidad estructural del pavimento existente es la adecuada.

El método de diseño racional puede usarse también para determinar la capacidad estructural residual del pavimento fallado. El análisis racional del pavimento existente requiere los siguientes datos de entrada:

- Los espesores de las capas del pavimento;
- Los módulos elásticos derivados de los resultados de ensayos de laboratorio, de ensayos DCP y de medidas de la cuenca de deflexiones; y
- La relación de Poisson de los materiales de las diferentes capas del pavimento.

PASO 6 *Diseño preliminar de la rehabilitación*

Después que se hayan entendido las causas de la falla, el siguiente paso en la metodología de diseño de pavimentos es determinar opciones preliminares de diseño de la rehabilitación. Pueden considerarse un rango de opciones. En este ejemplo se han contemplado las siguientes:

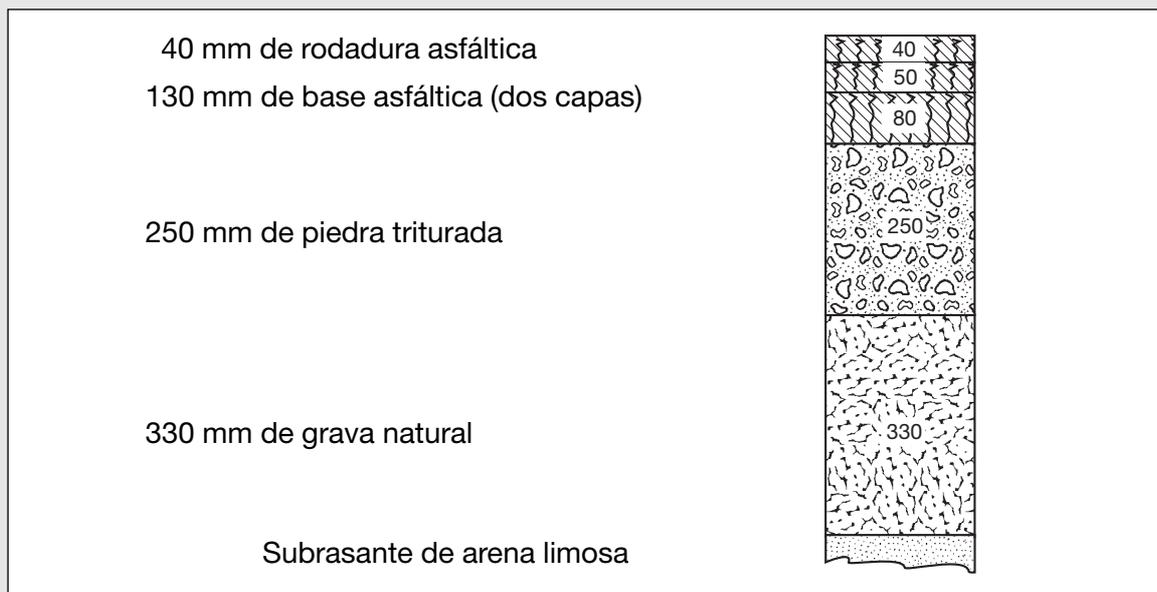
- La reconstrucción total del pavimento;
- La colocación de capas asfálticas;
- El reciclaje in situ.

El diseño de los espesores de las capas del pavimento para estas alternativas con el tráfico de diseño debe realizarse mediante alguno de los procedimientos tratados, como por ejemplo los dados por el Instituto del Asfalto, el TRRL, o por el método de diseño racional. Culminado lo anterior, puede escogerse el diseño final del pavimento, con base en la evaluación económica de estas opciones.

La secuencia de la fase de diseño preliminar se explica con el siguiente escenario:

- Una sección de una autopista para tráfico pesado tiene fallas severas y presenta ahuellamientos y grietas.
- Durante las discusiones con las autoridades viales se concluyó que se requiere un diseño para diez años de vida útil. Durante este período se propone seguir un plan mínimo de mantenimiento.
- De acuerdo con la información analizada, se estima un tráfico de diseño de 10 millones de E.E.
- Las investigaciones indican que la capacidad estructural del pavimento existente está muy por debajo de la requerida para el tráfico de diseño, y que la parte superior del pavimento es débil.

- Los apiques muestran que el pavimento consiste en:



Las tres opciones consideradas en la etapa de diseño preliminar que se muestran esquemáticamente en la Figura A1.6 y se describen en detalle a continuación, tienen una capacidad estructural para un tráfico de diseño de 10 millones de E.E.

Opción 1: Reconstrucción del pavimento

En esta opción se considera remover toda la capa asfáltica agrietada (170 mm), descartándola, y compactar nuevamente la piedra triturada de la capa de base, sobre la cual se colocará una capa adicional de piedra triturada de 150 mm. Finalmente, se pondrán 80 mm de base asfáltica y 50 mm de capa de rodadura para completar el pavimento reconstruido. El costo estimado de esta opción es de US\$ 30,12 por m² (ver Apéndice 5).

Opción 2: Colocación de capas asfálticas

Antes de colocar las capas asfálticas se removerán y parcharán las áreas localizadas que muestran fallas severas, como piel de cocodrilo o ahuellamientos. Se asume que el 12 % del área más dañada, se tratará mediante fresado hasta una profundidad de 90 mm, y luego se parchará con mezcla asfáltica. Una vez terminado este trabajo, el ancho completo del pavimento se cubrirá con una capa asfáltica de base de 80 mm y después con una capa de rodadura de 50 mm. El costo estimado de esta alternativa es de US\$ 20,40 por m².

Opción 3: Reciclaje profundo

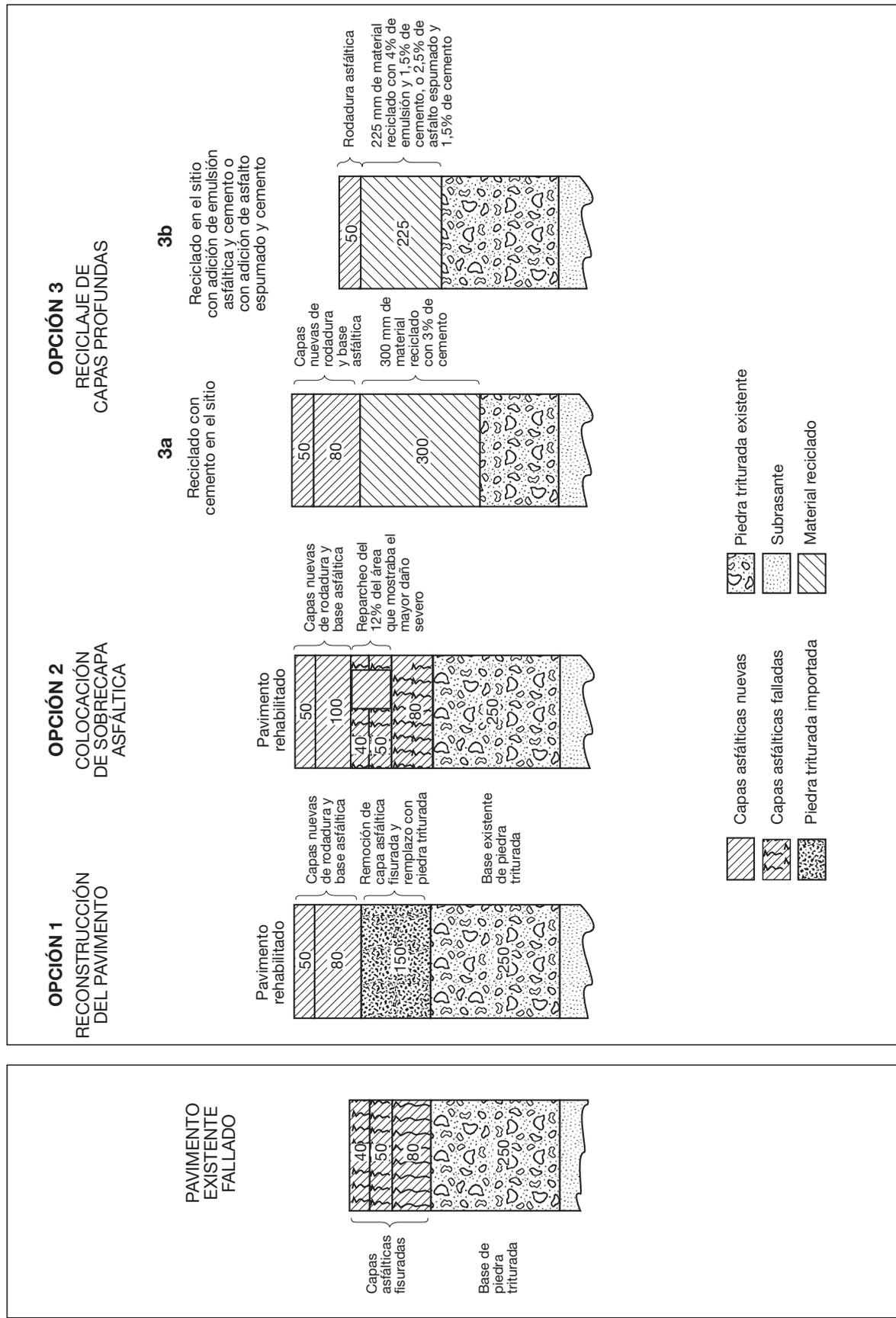
El reciclaje profundo puede llevarse a cabo con el uso de agentes estabilizadores, entre ellos cemento, emulsión asfáltica o asfalto espumado. Un pequeño porcentaje de cemento (generalmente 1,5 %) se usará en combinación con la emulsión asfáltica o con el asfalto espumado.

En la Figura A1.6, se describen las alternativas de reciclaje con agentes estabilizadores. Debe hacerse énfasis en que todas las alternativas tienen capacidades estructurales similares.

Opción 3a: Reciclaje con cemento

El pavimento existente se recicla hasta una profundidad de 300 mm, usando 3 % de cemento como agente estabilizador. Sobre la capa reciclada se colocará una capa de base asfáltica de 80 mm y una capa de rodadura de 50 mm de espesor. El costo estimado de esta alternativa es de US\$ 18,86 por m².

Fig A.1.6 Opciones de rehabilitación para el reciclaje profundo



Opción 3b: Reciclaje con la combinación de emulsión asfáltica y cemento, o asfalto espumado y cemento

Se reciclan 255 mm del pavimento existente, usando una combinación de 4 % de emulsión asfáltica y 1,5 % de cemento, o de 2,5 % de asfalto espumado y 1,5 % de cemento. Sobre la capa reciclada se pondrá una capa de rodadura asfáltica de 50 mm de espesor. En este caso, los costos estimados por metro cuadrado son los siguientes: con emulsión asfáltica, US\$ 12,07, y con asfalto espumado, US\$ 10,72.

PASO 7 Selección del diseño de la rehabilitación

En las comparaciones de costos tabuladas a continuación se indica que las opciones de reciclaje profundo son las más efectivas desde el punto de vista económico y que, por tanto, es importante investigar con mayor detalle el uso de este proceso.

La opción del reciclaje profundo con la combinación de asfalto espumado y cemento es la que tiene menor costo por metro cuadrado.

Tabla A1.6 Comparación de costos

Opción	Costo por m² (US\$)
1. Reconstrucción del pavimento	30,12
2. Colocación de capas asfálticas	20,40
3. Reciclaje en frío con:	
• Cemento	18,86
• Combinación de emulsión asfáltica o asfalto espumado	12,07 10,72

PASO 8 Diseños de mezclas en el laboratorio

La estimación preliminar de los costos se basó en hipótesis tomadas de experiencias previas relacionadas con los contenidos de estabilizador y con las propiedades de los materiales reciclados. El siguiente paso consiste en verificar dichas hipótesis desarrollando un trabajo apropiado de diseño de mezclas. En esta etapa es posible que tenga que incorporarse nuevo material para mejorar la gradación de la mezcla reciclada, o para elevar su calidad (por ejemplo, para disminuir la plasticidad).

PASO 9 Diseño final del pavimento

El diseño final del pavimento puede proponerse tomando en cuenta el contenido de estabilizador y las propiedades de la mezcla reciclada, así como el efecto que ésta tiene en el costo de la rehabilitación. Si es necesario mezclar algún agregado adicional, el costo extra del material debe considerarse en esta etapa para así estimar el costo final del trabajo.

A1.2 Reciclaje superficial o de capas delgadas

PASO 1 **Determinación de los requerimientos del propietario de la vía**

Antes de entrevistarse con el propietario de la vía, resulta recomendable realizar una inspección visual con el propósito de ganar cierto conocimiento del tipo y nivel de fallas del pavimento. En esta etapa, es probable que el propietario esté enterado de que la calidad de la vía se ha deteriorado y que hay que tomar medidas para su rehabilitación. La decisión del propietario de la vía de realizar un reciclaje superficial puede basarse en el hecho de que las fallas sólo se restringen a las capas superficiales del pavimento, o en que debido a la falta de recursos únicamente puede costearse una estrategia de mantenimiento a corto plazo. Es muy importante que el propietario de la vía entienda que un reciclaje superficial no constituye un refuerzo sustancial del pavimento.

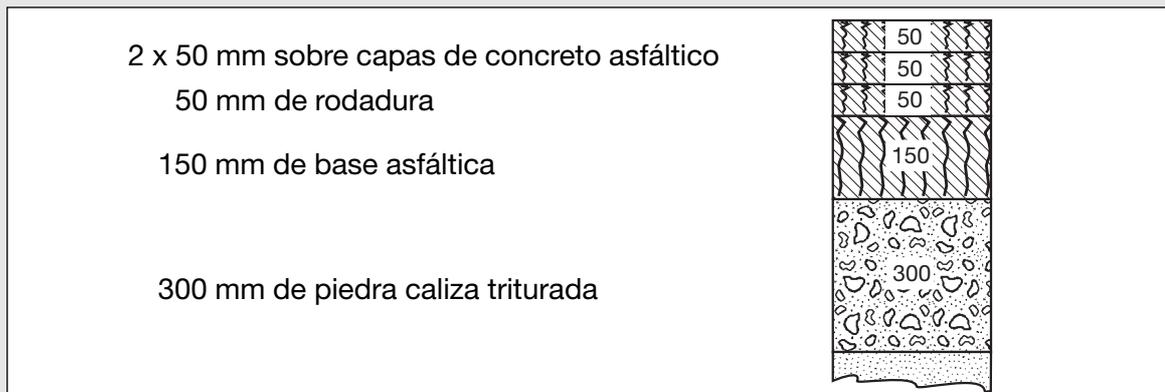
Durante las discusiones con el propietario de la vía, debe obtenerse la siguiente información:

- Los datos disponibles sobre el tráfico
- Los registros de mantenimiento del pavimento
- La información disponible del pavimento existente
- El tipo y posición de los servicios que pueden afectarse por la construcción
- Los problemas prácticos de construcción, como por ejemplo la acomodación del tráfico durante la construcción y las ayudas para el control del tráfico que se requerirán durante la etapa de investigación.

PASO 2 **Información disponible**

Un ejemplo típico de los registros del propietario sería:

- **Pavimento existente**



- **Información de tráfico**

En los casos en los cuales se trate el reciclaje superficial como una estrategia de rehabilitación a corto plazo, las tasas de crecimiento de tráfico y la vida remanente del pavimento no cumplen un papel muy importante. La información de tráfico se usa principalmente para planear la construcción, de tal manera que durante la misma pueda acomodarse el tráfico lo más eficientemente posible.

PASO 3 **Investigación del pavimento**

En el rango de métodos de investigación para el reciclaje superficial se cubren los siguientes aspectos:

- La investigación visual
- La verificación de espesores, generalmente mediante la toma de núcleos
- La toma de muestras, hasta la profundidad de reciclaje propuesta, para propósitos de diseño de mezclas

• Inspección visual

La inspección visual debe mostrar las áreas del pavimento que aún se encuentran intactas y cuáles presentan fallas evidentes.

En la inspección visual deben registrarse en detalle las diferentes formas de falla, con el objeto de analizarlas en términos de unos porcentajes de la longitud de vía.

En la Tabla A1.7 se muestra un ejemplo típico.

Tabla A1.7 Análisis visual de fallas				
Modo de falla del pavimento	% de la longitud de la vía por ancho total que exhibe fallas severas	Criterio de comportamiento para cada modo de falla (% de la longitud de la vía)		
		Intacto	Precaución	Severo
Agrietamiento	28	< 5	5 a 15	> 15
Deformación	7	< 5	5 a 15	> 15
Desintegración	10	< 10	10 a 15	> 15
Desgaste de la superficie	38	< 20	20 a 40	> 40

En este ejemplo puede observarse que el agrietamiento clasifica dentro de la categoría “severa” de criterios de comportamiento. La deformación, la desintegración (baches) y la textura de la superficie entran en la categoría de “precaución”. Estos son los resultados típicos de un pavimento que se beneficiaría con un reciclaje superficial.

La inspección visual detallada también ofrece la oportunidad de observar otros aspectos que necesitan atención, como por ejemplo deficiencias en el drenaje y daños en los hombros.

• Toma de núcleos

La toma de núcleos se realiza en sitios escogidos al azar a lo largo de la sección, para verificar los espesores de las capas asfálticas.

En la Tabla A1.8 se muestra un ejemplo típico de los resultados de la toma de núcleos.

Tabla A1.8 Análisis del espesor de las capas			
Núcleo número	1	2	3
Distancia en kilómetros	11 000	11 400	11 800
Carril	Límite Norte	Límite Sur	Límite Norte
Espesor de capa: Rodadura (mm)	51	39	53
Base	150	156	149

• Muestreo para el diseño de mezclas

Los núcleos son muy pequeños como para obtener material suficiente para un trabajo de diseño de mezcla. Las muestras para este propósito deben obtenerse por fresado, hasta la profundidad propuesta del reciclaje, de una sección corta del pavimento, empleando una máquina fresadora pequeña. La muestra obtenida de esta manera será similar a la encontrada cuando se usa una recicladora de escala real.

PASO 4 Opciones de rehabilitación

En la Figura A1.7 se ilustran tres opciones de rehabilitación con las cuales se obtiene, aproximadamente, la misma capacidad estructural.

Opción 1 Colocación de capas asfálticas

Antes de colocar las capas asfálticas, es necesario reparar las áreas que muestran fallas severas, de otra manera, se podrá esperar la aparición de fallas aisladas con grietas reflejadas en superficie. En este ejemplo, se asumen el fresado y el parchado de un 12 % de la superficie hasta una profundidad de 100 mm.

Después que se hayan terminado estas reparaciones, se recomienda la colocación de una capa asfáltica, de 80 mm, a lo ancho de la vía. El costo estimado de esta opción es de US\$ 12,00 por metro cuadrado (ver Apéndice 5).

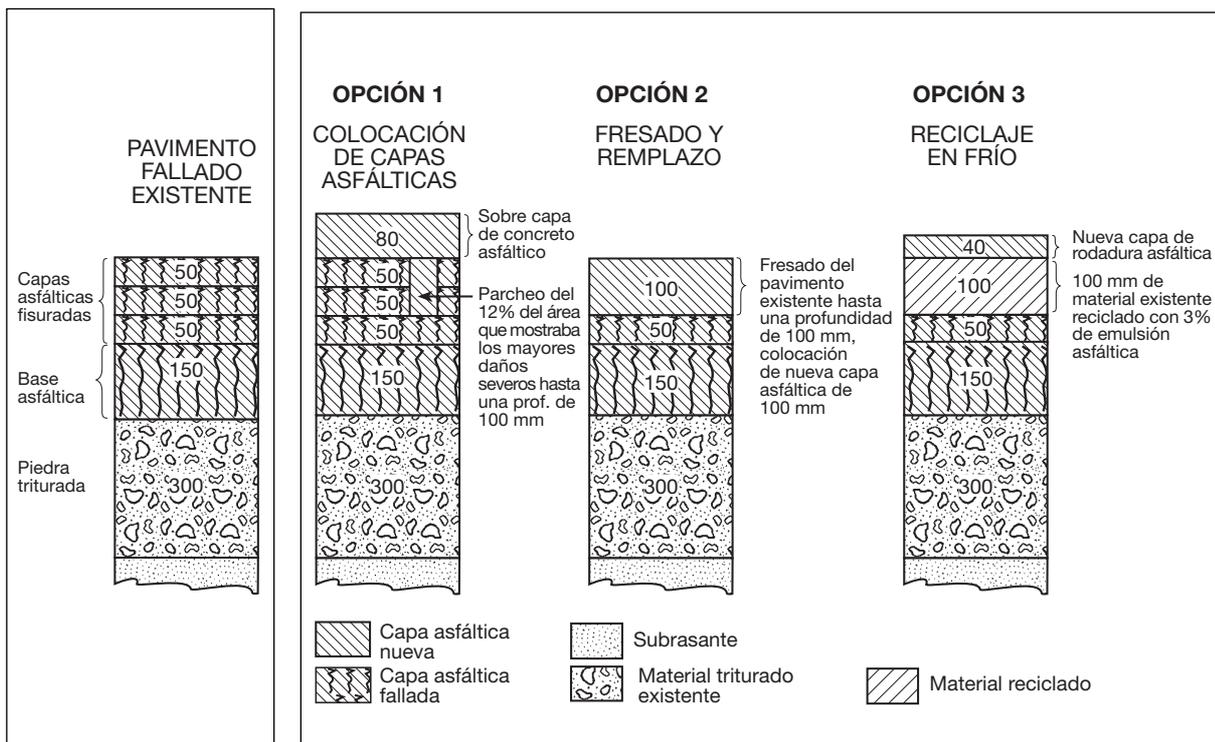
Opción 2 Fresado y remplazo de las capas asfálticas falladas existentes

El pavimento existente se fresa hasta una profundidad de 100 mm y se remplaza por 100 mm de mezcla asfáltica en caliente. En este caso, el costo estimado por metro cuadrado es de US\$ 15,60.

Opción 3 Reciclaje en frío

Esta opción se llevará a cabo reciclando 100 mm de espesor con 3 % de emulsión asfáltica. Sobre la capa reciclada se colocará una capa de rodadura asfáltica de 40 mm de espesor. El costo estimado por metro cuadrado es de US\$ 8,00.

Fig A1.7 Opciones de rehabilitación para el reciclaje de capas delgadas



PASO 5 Comparación de costos

Como puede observarse a continuación, el reciclaje superficial es la opción más económica entre los costos estimados.

Tabla A1.9 Costos comparativos

Opción	Costo por m² (US\$)
1. Colocación de capas asfálticas	12,00
2. Fresado y remplazo	15,60
3. Reciclaje en frío	8,00

PASO 6 Diseño de mezclas en el laboratorio

El siguiente paso consiste en determinar el porcentaje que debe usarse de emulsión asfáltica, por medio de un diseño de mezcla en el laboratorio con una muestra de material fresado procedente de la vía. Antes de llevar a cabo el diseño de la mezcla, hay que establecer la granulometría de la muestra, con el objeto de determinar si se requiere la adición de material fino, como polvo de trituración, para mejorar su gradación.

PASO 7 Diseño final del pavimento

Ahora puede terminarse el diseño del pavimento. El costo estimado se ajusta, teniendo en cuenta el contenido de asfalto óptimo resultante del diseño de mezcla y los posibles incrementos en los costos por la adición de finos (polvo) de trituración.

A1.3 Mejoramiento de vías en grava no pavimentadas

PASO 1 Determinación de los requerimientos del propietario de la vía

Durante las etapas iniciales de discusión con el propietario de la vía, debe determinarse si la geometría horizontal y vertical del pavimento existente cumple con los requerimientos establecidos. Este es un punto de particular importancia, debido a que una vez que la vía se encuentre pavimentada los vehículos transitarán a mayores velocidades. Otras consideraciones importantes que han de discutirse son el mejoramiento del drenaje existente y los requerimientos adicionales de la vía como las barandas de seguridad, la señalización, entre otras.

Durante estas discusiones debe revisarse el efecto que las vías pavimentadas o cubiertas tienen en los patrones del tráfico existente. Las vías pavimentadas tienden a atraer más tráfico, el cual inevitablemente afectará el período de diseño de las mismas. También hay que enfatizar en los beneficios ambientales, como hacer innecesario reabrir canteras o fuentes de explotación de materiales, al igual que la eliminación de los problemas de polvo.

PASO 2 Información disponible

Puede haber información útil, disponible por parte del propietario de la vía, como por ejemplo:

- Registros sobre aplicaciones anteriores de capas de grava y sobre su calidad
- Fuentes locales de grava
- Información de tráfico

PASO 3 Investigación del pavimento

Generalmente se usan los siguientes métodos de investigación:

- Investigación visual
- Verificación de los espesores de las capas granulares
- Toma de muestras de la capa de grava para ensayos de laboratorio
- Ensayos con el DCP

• Inspección visual

Cuando se llevan a cabo inspecciones visuales para el mejoramiento de vías de material granular no pavimentadas, hay que tomar nota de:

- Los anchos existentes de la vía
- La condición actual de la superficie de la vía, por ejemplo corrientes de agua y presencia de grandes rocas
- El drenaje
- Las características geométricas inadecuadas, como curvas muy cerradas, o pendientes excesivas
- La localización de las zonas de préstamo de materiales
- Evidencia de la mala calidad de la subrasante, por ejemplo si en la ruta hay áreas pantanosas superficiales

• **Verificación de profundidades y muestreo**

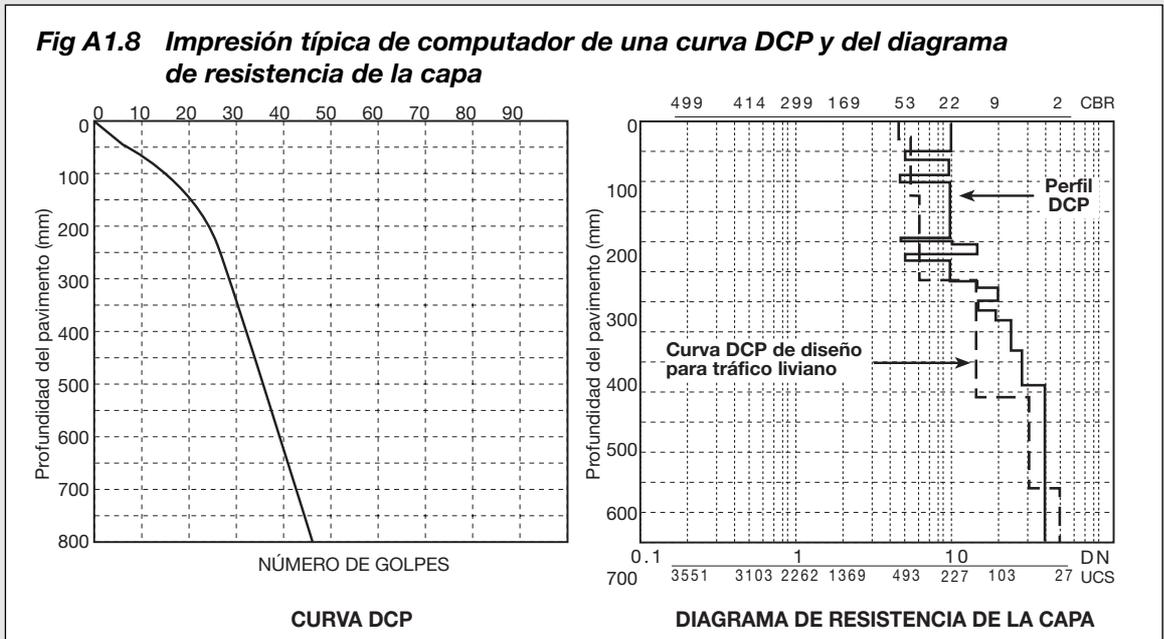
Deben excavarse pequeños hoyos de ensayo, en la superficie de la vía, a intervalos de aproximadamente 200 m, para verificar el espesor de la capa granular superficial y tomar muestras de material con el fin de determinar la gradación y la plasticidad, a intervalos que no excedan un kilómetro, o donde haya un cambio visible en la calidad de la grava. Las muestras deben ser lo suficientemente grandes (del orden de 100 kg) y representativas de cada cambio significativo en su calidad. Estas muestras se usan para realizar los diseños de mezcla.

• **Ensayos con el penetrómetro dinámico de cono**

En este ejemplo las pruebas con el DCP se usan como un medio para establecer áreas en que la subrasante es de mala calidad.

Las pruebas con el DCP deben hacerse cada 500 m, pero más frecuentemente donde se identifiquen condiciones pobres de la subrasante. Los análisis de los resultados de las pruebas con el DCP se hacen con un programa apropiado de computador, como se discutió con anterioridad. En la Figura A1.8 se ilustra un gráfico típico de una prueba con el DCP, en donde se indican los valores de CBR in situ junto con la curva de diseño DCP, para vías con tráfico liviano.

En el diagrama de resistencia de la capa puede observarse que las resistencias in situ se encuentran a la derecha de la curva de diseño DCP, lo que indica que la parte superior del pavimento es débil; por tanto, la capacidad estructural del pavimento se beneficiará con el proceso de mejoramiento.



PASO 4 Cuando se requiera traer material granular adicional para superar las deficiencias debidas a espesores inadecuados de las capas de grava en el pavimento, deben tomarse muestras de las fuentes de préstamo, las cuales deben incluirse en el programa de ensayos.

PASO 5 **Opciones de rehabilitación**

Las opciones típicas de rehabilitación que pueden considerarse para mejorar una vía de material granular no pavimentada se muestran esquemáticamente en la Figura A1.9. El pavimento existente está constituido por una capa de grava, no cubierta, de 150 mm de espesor, que descansa sobre una subrasante no tratada.

Opción 1 Capa de piedra triturada

Sobre la grava existente se colocará una capa de base de material granular triturado, bien gradado, de 125 mm de espesor y se aplicará una capa de sello con grava fina. El costo estimado por metro cuadrado para esta opción es de US\$ 9,25 (ver el Apéndice 5).

Opción 2 Capa de grava natural estabilizada con cemento

Sobre la capa existente se colocará una capa de grava natural estabilizada con 3 % de cemento con un espesor de 125 mm y se aplicará una capa de sello con grava fina. En este caso el costo estimado es de US\$ 6,85 por metro cuadrado.

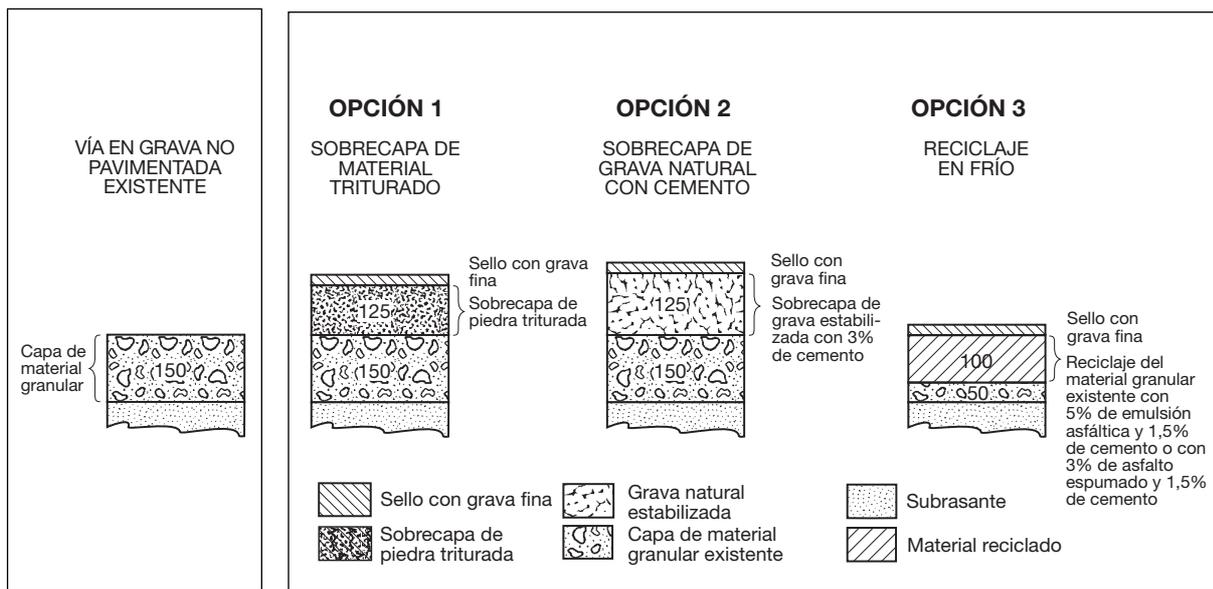
Opción 3 Reciclaje en frío

Se consideran dos opciones para el reciclaje en el sitio:

- a) Se reciclará la grava existente con 5 % de emulsión asfáltica y 1½ % de cemento hasta una profundidad de 100 mm y se aplicará sobre su superficie un sello con grava fina.
- b) Se reciclará la grava existente con 3 % de asfalto espumado y 1½ % de cemento hasta una profundidad de 100 mm y se aplicará sobre su superficie un sello con grava fina.

El costo estimado por metro cuadrado para la opción en la que se usa emulsión asfáltica es de US\$ 6,10, y para la opción en la que se usa asfalto espumado es de US\$ 5,34.

Fig A1.9 Opciones para el mejoramiento de una vía en grava no pavimentada



Comparación de costo

De la comparación de los costos consignados en la Tabla A1.10, es evidente que el reciclaje en frío con asfalto espumado es la opción más efectiva.

Tabla A1.10 Comparación de costos	
Opción	Costo por m² (US\$)
1. Capa de piedra triturada	9,25
2. Capa de grava natural cementada	6,85
3. Reciclaje en frío con	
• Emulsión asfáltica	6,10
• Asfalto espumado	5,34

PASO 6 *Diseño de la mezcla*

El siguiente paso es llevar a cabo los diseños de mezclas con muestras representativas de los diferentes tipos de grava encontrados a lo largo del proyecto. Con el diseño se determinará el contenido óptimo de ligante y las propiedades de los materiales que van a tratarse con asfalto espumado. Donde se encuentre la necesidad de incorporar materiales adicionales de otras fuentes, deben hacerse diseños de mezclas con la muestra de grava de la vía existente y material tomado de la fuente apropiada.

PASO 7 *Diseño final*

El diseño del mejoramiento de la vía puede terminarse con base en los resultados de los diseños de las mezclas y los análisis de costos.

Apéndice 2

Procedimientos para el diseño de mezclas

A2.1	Procedimiento de laboratorio para diseñar mezclas de materiales estabilizados con cemento	109
A2.2	Procedimiento de laboratorio para diseñar mezclas de materiales tratados con emulsión asfáltica	112
A2.3	Procedimiento de laboratorio para diseñar mezclas de materiales tratados con asfalto espumado	114
A2.4	Aparatos de laboratorio necesarios para diseñar mezclas de materiales estabilizados con cemento	118
A2.5	Aparatos de laboratorio necesarios para diseñar mezclas de materiales tratados con emulsión asfáltica o con asfalto espumado	122

A2.1 Procedimiento de laboratorio para diseñar mezclas de materiales estabilizados con cemento

A2.1.1 Preparación de muestra

- Prepare unos 150 kg de material seco al aire.
- Mezcle perfectamente la muestra.
- Divida la muestra en cinco lotes de cerca de 7 kg cada uno.

A2.1.2 Determinación del contenido de humedad higroscópica

- Del material restante, tome dos muestras representativas, de 500 a 1000 g cada una, y colóquelas en recipientes adecuados para determinar su contenido de humedad. Se requerirá una muestra de mayor tamaño cuanto más grueso sea el agregado.
- Pese las muestras inmediatamente con aproximación a 0,1 g y séquelas en horno a una temperatura comprendida entre 105°C y 110°C, hasta alcanzar masa constante.
- Transfiera el material restante a recipientes herméticos.

A2.1.3 Determinación del contenido óptimo de humedad (OMC) y de la densidad seca máxima (MDD) del material estabilizado

- Para cada uno de los cinco lotes preparados, como se describió en el numeral A2.1.1, pese una cantidad de agente estabilizador equivalente al 4 % de la masa seca al aire del material original.
- Para el material estabilizado, determine el contenido óptimo de humedad mediante el ensayo de relación humedad-densidad, modificado de acuerdo con la designación AASHTO T180. El agente estabilizador debe incorporarse al material crudo u original y mezclarse inmediatamente, antes de la adición del agua. Con el objeto de simular las condiciones en la vía, la compactación del material estabilizado se pospone por una hora después de haberse realizado la mezcla con el agente estabilizador y el agua. El material debe cubrirse con un trapo humedecido y mezclarse con una pala, cada media hora.

A2.1.4 Preparación de muestras para el ensayo de resistencia a la compresión inconfiada (UCS)

- Divida el material seco al aire, restante en los recipientes herméticos, en tres lotes similares de aproximadamente 21 kg (seco en horno) cada uno. Mediante adición o retiro de material, ajuste la masa de cada uno de los lotes a 21 kg (seco en horno). (Para cada lote, calcule la masa requerida de material seco al aire, teniendo en cuenta el contenido de humedad determinado sobre las muestras en la sección A2.1.2.)
- Seleccione tres contenidos diferentes de agente estabilizador, con los cuales se fabricarán las probetas para determinar la UCS. Usualmente, se trabaja con incrementos del 2 %, por ejemplo: 2,4 y 6 % con respecto a la masa total del material seco en horno. Calcule y pese las tres cantidades requeridas de agente estabilizador, para cada uno de los tres lotes preparados del material.
- Calcule y mida la cantidad de agua requerida en cada lote, para alcanzar el OMC (ver Nota ii). Esta cantidad es la diferencia entre la que está presente en el material seco al aire (como se determinó en A2.1.2) y la requerida para obtener el OMC (como se estableció en A2.1.3).
- Mezcle con el agente estabilizador y luego con el agua, tratando posteriormente la mezcla, durante cuatro horas, en la misma forma descrita en A2.1.3 para determinar la MDD y el OMC.
- Pese los moldes que se usarán para compactar las muestras.
- De cada uno de los lotes, compacte tres muestras siguiendo el método estándar que se emplea para la determinación de la relación humedad-densidad modificada (AASHTO T180).

- Pese los moldes junto con las muestras compactadas.
- Retire las probetas de los moldes, bien sea desensamblando el molde partido o mediante un extractor si se usa un molde común (ver Nota iii). Estas son las muestras para el ensayo de UCS.
- Sobre una bandeja coloque las probetas para el ensayo de UCS, dejándolas listas para su curado.

Cálculos

- *Contenido de humedad (%) (expresada con aproximación al 0,1 %)*

$$W_{\text{Moist}} = \frac{(a - b)}{(b - c)} \times 100$$

[fórmula A 2.1.1]

Donde W_{Moist} = Contenido de humedad [% de masa seca de material]
 a = Masa del molde y del material húmedo [g]
 b = Masa del molde y del material seco [g]
 c = Masa del molde [g]

- *Cantidad de agente estabilizador que se agregará al material (con aproximación al g)*

$$M_{\text{Cement}} = \frac{C_{\text{Add}}}{100} \times [M_{\text{Sample}} \times (1 + \frac{C_{\text{Add}}}{100})]$$

[fórmula A 2.1.2]

Donde M_{Cement} = Masa de cal o cemento que debe agregarse [g]
 M_{Sample} = Masa seca de la muestra [g]
 C_{Add} = Porcentaje de cal o cemento requerido [% en masa]

- *Cantidad de agua que se agregará al material (con aproximación al ml)*

$$M_{\text{Water}} = \frac{W_{\text{OMC}}}{100} \times [(M_{\text{Sample}} + M_{\text{Cement}}) - (M_{\text{Sample air}} - M_{\text{Sample}})]$$

[fórmula A 2.1.3]

Donde M_{Water} = Masa de agua que debe agregarse [g]
 W_{OMC} = Contenido óptimo de humedad [% en masa]
 M_{Sample} = Masa seca de la muestra [g]
 $M_{\text{Sample air}}$ = Masa de la muestra seca al aire [g]
 M_{Cement} = Masa de cal o cemento agregada [g]

- *Densidad seca de las probetas para el ensayo de UCS, con aproximación a 5 kg/m³*

$$D = \frac{100}{(W_{\text{Moist}} + 100)} \times \frac{4 \times M_{\text{Briq.}}}{(\pi \times d^2 \times h)} \times 1000$$

[fórmula A 2.1.4]

Donde D = Densidad seca [kg/m³]
 W_{Moist} = Contenido de humedad en la muestra durante la compactación [% en masa]
 $M_{\text{Briq.}}$ = Masa de briquea inmediatamente después de la compactación [g]
 h = Altura promedio de briquea [cm]
 d = Diámetro de briquea [cm]

Notas

- i Cuando el material contenga agregados blandos y friables que se romperán durante la compactación (por ejemplo, ciertos tipos de ferricrete, calcrete, areniscas blandas, etc.), estas partículas tendrán que romperse previamente. En los casos extremos, el operario usará su criterio para definir la extensión a la cual deberán romperse las partículas.
- ii Cuando se calcule la cantidad de agua requerida, dependiendo de las condiciones climáticas se recomienda incorporar 0,3 a 0,5 % más de agua, para permitir la evaporación. La cantidad real se deja a juicio del operador.
- iii Con ciertos tipos de materiales carentes de cohesión, puede ser necesario dejar las probetas dentro de sus moldes durante 24 horas, con el objeto de que desarrollen resistencia antes de su extracción. Si se requiere, pueden mantenerse en un cuarto húmedo o cubiertas con un trapo humedecido.

A2.1.5 Curado de las probetas

- Cure las probetas durante siete días, en un cuarto adecuado con humedad relativa del 95 al 100 % y temperatura de 22 a 25°C, o dentro de bolsas plásticas sumergidas en un baño con agua.
- Después de los siete días, retire las probetas del cuarto de curado o de las bolsas plásticas y súmerjalas en agua durante cuatro horas. La temperatura del agua debe controlarse entre 22 y 25°C.
- Un método alternativo consiste en curar las probetas a una temperatura de 70 o 75°C durante 24 horas, dentro de recipientes herméticos.

A2.1.6 Determinación de la resistencia a la compresión

- Retire las probetas del baño de agua.
- Falle las probetas en la máquina de compresión. La carga debe aplicarse sobre las caras planas de la probeta a una velocidad de 140 kPa/s.
- Registre la carga con aproximación a 1 kN.
- Calcule la resistencia a la compresión inconfiada con aproximación a 10 kPa, como sigue:

$$U = \frac{P}{\pi r^2} = \frac{P}{0,01824}$$

[fórmula A 2.1.5]

Donde U = Resistencia a la compresión inconfiada (UCS) [kPa]
P = Carga requerida para fallar la muestra [kN]
r = Radio de la probeta de ensayo (0,0762 m)

- Con el propósito de establecer la cantidad requerida de agente estabilizador que dé lugar a una mezcla que cumpla con la UCS especificada, es necesario preparar tres probetas por cada contenido de agente. (Para el control de campo, es suficiente una probeta por muestra.)
- Los resultados obtenidos en el ensayo de UCS, dibujados en un diagrama de contenido de estabilizador contra resistencia, permitirán definir la cantidad requerida de agente que da lugar a una mezcla que cumple con la especificación de resistencia. Para cada contenido de agente estabilizador tome el promedio de la UCS obtenido para las tres probetas, ignorando cualquier resultado que evidentemente sea incorrecto, debido posiblemente al daño de la probeta antes de ensayarla.
- La adición de escoria de cemento a las mezclas con cemento Portland ordinario (OPC) retarda el endurecimiento inicial. La resistencia, a los siete días, de una mezcla 1:1 de estos dos agentes estabilizadores es de cerca del 83 % de la resistencia alcanzada con el OPC.

A2.2 Procedimiento de laboratorio para diseñar mezclas de materiales tratados con emulsión asfáltica

A2.2.1 Alcanç

En el procedimiento se describe el diseño de la mezcla de materiales granulares con la adición de cemento y emulsión asfáltica, como agentes estabilizadores. Éste puede dividirse en las siguientes operaciones:

- Determinación del contenido óptimo de fluidos (OFC); y
- Determinación del contenido óptimo de ligante asfáltico residual para el OFC.

A2.2.2 Agregados

- Lleve a cabo ensayos estándar para determinar la gradación y el índice de plasticidad (PI).
- Si es necesario, ajuste la granulometría para cumplir con los requerimientos de una envolvente de gradación.
- Seque la muestra en horno a 105°C, hasta obtener masa constante.
- Cuarte la muestra hasta un tamaño trabajable. Para la determinación del OFC, se requieren cinco muestras de aproximadamente 1150 g cada una, y para el procedimiento de diseño de la mezcla otras cuatro muestras adicionales de aproximadamente 4000 g cada una.
- Dependiendo del IP, agregue 1 o 2 % de cemento o de cal a la muestra. Cuando el IP es mayor que 10, deberán considerarse mayores porcentajes de cal.

A2.2.3 Determinación del contenido óptimo de fluidos (OFC)

- Mezcle cinco litros de emulsión asfáltica con cinco litros de agua.
- Determine el contenido óptimo de humedad (OMC) para el material tratado con la mezcla de emulsión y agua, empleando la relación humedad – densidad modificada, ensayo AASHTO T180. El OMC así determinado corresponde al OFC. Los incrementos sugeridos para la adición de fluidos son:
 - Grava natural 2 % entre 2 % y 12 %
 - Piedra triturada gradada 1 % entre 1 % y 6 %
- Registre la densidad seca máxima (MDD) y el OFC.

Calcule la densidad seca de las probetas compactadas mediante la siguiente fórmula:

$$D = \frac{100}{(W_{\text{Fluid}} + 100)} \times \frac{4 \times M_{\text{Briq.}}}{(\pi \times d^2 \times h)} \times 1000$$

[fórmula A 2.2.1]

Donde	D	= Densidad seca	[kg/m ³]
	W _{Fluid}	= Contenido de fluidos en la muestra durante la compactación	[% en masa]
	M _{Briq.}	= Masa de briqueta inmediatamente después de la compactación	[g]
	h	= Altura promedio de briqueta	[cm]
	d	= Diámetro de briqueta	[cm]

Nota. $\frac{100}{(W_{\text{Fluid}} + 100)}$ es el factor usado para convertir la densidad húmeda en densidad seca.

Para ensayos posteriores, excluya cualquier briqueta cuya densidad seca difiera en más de 30 kg/m³ del valor promedio de la respectiva serie.

A2.2.4 Determinación del contenido óptimo de asfalto residual

- Preparación de la muestra.

- Prepare 1150 g de muestra seca en horno;
- Pese y añada los agregados la cantidad requerida de cal o cemento, mezclándolos con ellos;
- Combine la emulsión asfáltica y el agua en las proporciones requeridas para mantener constante el OFC, mientras se varía el contenido de asfalto, de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$W_{\text{add}} = \text{OFC} - W_E - 0,5 \times B_E$$

[fórmula A 2.2.2]

Donde	W_{add} = Agua adicional en la mezcla	[%]
	OFC = Contenido óptimo de fluidos	[%]
	W_E = Agua en la emulsión asfáltica	[%]
	B_E = Asfalto residual en la emulsión	[%]

- Agregue la mezcla de emulsión y agua a los agregados y mezcle perfectamente.

- Procedimiento para la compactación de las probetas (manufactura de las briquetas)

- Prepare el molde Marshall y el martillo limpiando el molde, el collar, el plato de base y la cara del martillo de compactación;
- Coloque un plástico redondo o un disco de papel en la base del molde;
- Pese material suficiente para obtener una probeta compactada de $63,5 \pm 1,5$ mm de altura (normalmente son suficientes 1150 g). Con una espátula, punce la mezcla quince veces alrededor de su perímetro y diez veces distribuidas sobre el área restante, dejando la superficie ligeramente redondeada;
- Compacte la muestra aplicando 75 golpes con el martillo de compactación. Debe asegurarse de que el martillo caiga libremente;
- Retire el molde junto con su collar del pedestal de compactación, inviértalo y colóquelo de nuevo, aplicando presión de tal manera que descansa firmemente sobre el plato de base;
- Compacte la otra cara aplicando nuevamente 75 golpes.

- Curado

- Después de la compactación, retire el plato de base y permita que la probeta se cure durante 24 horas dentro del molde a la temperatura del cuarto, antes de extraerla con un dispositivo apropiado,
- Coloque las probetas sobre una bandeja plana y cúrelas en un horno de ventilación forzada a 40°C durante 72 horas.

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

El ensayo ITS estándar se usa para evaluar las probetas tanto en condición seca como en condición saturada. La ITS se determina midiendo la última carga, hasta alcanzar la falla, de una probeta que se somete a una velocidad de deformación constante de 50,8 mm/minuto sobre su eje diametral. El procedimiento es el siguiente:

- Deje las probetas a la temperatura del cuarto durante toda la noche, antes del ensayo;
- Mida la altura de cada probeta, en cuatro puntos uniformemente espaciados alrededor de la circunferencia y calcule la altura promedio, L (m);
- Mida el diámetro de cada probeta, D (m);
- Antes del ensayo, coloque las probetas en una cabina de aire a $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, como mínimo por una hora, pero por no más de dos horas;
- Retire una probeta de la cabina de aire, y colóquela en el aparato de carga;

- Ajuste las mordazas de carga sobre la probeta, de tal manera que se encuentren paralelas y queden centradas sobre el plano diametral vertical;
- Coloque el plato de transferencia de carga sobre la mordaza superior y centre todo el sistema ensamblado bajo el pistón de la máquina de ensayo de compresión;
- Aplique la carga sobre la muestra, sin impacto violento, a una velocidad de desplazamiento de 50,8 mm por minuto hasta registrar la carga máxima alcanzada;
- Registre la carga P (en kN), con aproximación a 0,1 kN.

Para determinar la ITS de las probetas saturadas, antes de su ensayo use el siguiente procedimiento:

- Coloque la probeta curada en un desecador con salida para vacío y cúbrala con agua a $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$;
- Aplique un vacío de 50 mm de mercurio durante 60 ± 1 minutos, iniciando este período una vez que se haya alcanzado la presión de vacío necesaria. Si no se cuenta con un desecador con salida para vacío, sumerja las probetas en agua a $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, durante 24 horas;
- Retire las probetas, séquelas superficialmente y ensáyelas para determinar la carga de tensión última, como ya se describió.

Calcule la ITS para cada muestra con aproximación a 1 kPa, usando la siguiente fórmula:

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

[fórmula A 2.2.3]

Donde	ITS = Resistencia a la tensión indirecta	[kPa]
	P = Carga máxima aplicada	[kN]
	h = Altura promedio de la probeta	[m]
	d = Diámetro promedio de la probeta	[m]

- Determinación del contenido de asfalto de diseño

Para todas las muestras (tanto secas como saturadas), realice un gráfico de ITS medido contra contenido de asfalto (asfalto incorporado). El contenido de asfalto incorporado para el cual la ITS de las muestras saturadas es máxima, se toma como el contenido de asfalto de diseño para la mezcla tratada con emulsión.

A2.2.5 *Determinación de propiedades adicionales de la mezcla con el contenido de asfalto de diseño*

Cuando sea necesario, pueden realizarse ensayos adicionales sobre la mezcla fabricada con el contenido de asfalto de diseño, tales como ensayos de módulo resiliente y de creep dinámico. Estos resultados son útiles para el diseño estructural de las capas construidas con materiales tratados con emulsión asfáltica. Para llevar a cabo estos ensayos, deberán fabricarse y curarse probetas adicionales con el contenido de asfalto de diseño, de la manera descrita con anterioridad.

A2.3 **Procedimiento de laboratorio para diseñar mezclas de materiales tratados con asfalto espumado**

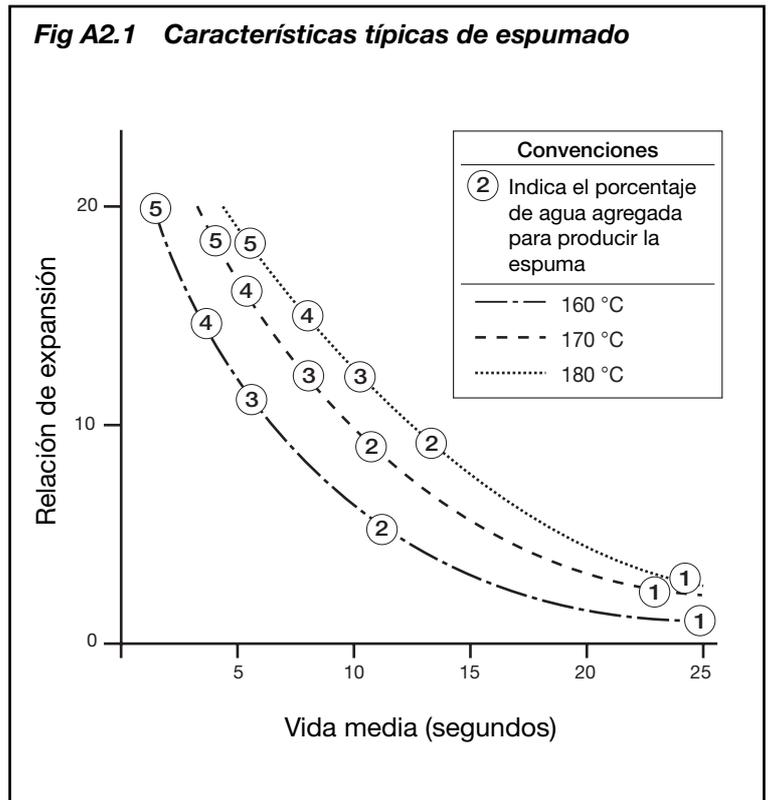
A2.3.1 *Determinación de las características de espumado del cemento asfáltico*

El objetivo es determinar la temperatura y el porcentaje de agua que hay que inyectar, los cuales optimizarán las propiedades de la espuma de un cemento asfáltico específico, maximizando su relación de expansión y su vida media. Lo anterior se logra de la siguiente manera:

- Calibre los caudales del asfalto y del agua,
- Seleccione tres temperaturas a las cuales se medirán las características de la espuma (normalmente 160, 180 y 200°C). Lleve el asfalto a la temperatura requerida, manteniéndola como mínimo

durante diez minutos antes de iniciar la producción de la espuma. Para cada temperatura, mida las características de cinco muestras de espuma de asfalto, fabricadas con contenidos de agua diferentes, con respecto a la masa de asfalto, en el intervalo entre 1 y 5 %, con incrementos del 1 %. Este procedimiento es el siguiente:

- Para cada muestra, descargue 500 g de espuma dentro de una caneca metálica de 20 litros.
- Sobre la pared de la caneca, marque con un lápiz el volumen máximo de expansión alcanzado por la espuma. Usando un cronómetro, mida el tiempo – en segundos – que tarda la espuma en asentarse hasta la mitad del máximo volumen alcanzado; este tiempo se define como la vida media. Calcule la relación de expansión dividiendo el volumen máximo alcanzado por la espuma por el volumen del asfalto en la caneca después de que la espuma se ha dissipado completamente (como mínimo tarda tres minutos).
- Sobre un mismo eje de coordenadas, dibuje los gráficos de relación de expansión contra vida media, obtenidas para los contenidos de agua y temperatura evaluados de todas las muestras, tal como se aprecia en la Figura A2.1. Esto permitirá optimizar la temperatura y el contenido de agua para fabricar las espumas.



A2.3.2 Preparación de los agregados

- Lleve a cabo ensayos estándar para determinar la gradación y el índice de plasticidad (IP) de los agregados;
- Si es necesario, mezcle más de un agregado para ajustar la granulometría y cumplir con la gradación especificada;
- Determine el contenido óptimo de humedad (OMC) mediante el ensayo de relación humedad - densidad, modificado, designación AASHTO T180
- Seque el material a 105°C, hasta masa constante. En caso de tratarse de materiales procedentes de carpetas asfálticas, éstos deben secarse a una temperatura menor con el propósito de evitar que las partículas se mantengan adheridas entre sí;
- En los materiales procedentes de carpetas asfálticas, determine su contenido de cemento asfáltico;
- Cuando el material esté seco, divídalo en cinco muestras representativas de 10 kg cada una.

A2.3.3 Determinación del contenido óptimo de cemento asfáltico

- Preparación de las muestras y tratamiento con asfalto espumado

Preparación de las muestras

Cada una de las cinco muestras de aprox. 10 kg, se trata con asfalto espumado, con un contenido de asfalto diferente, usando incrementos del 1%. Para cada muestra se desarrolla el siguiente procedimiento:

- Coloque la muestra completa dentro del recipiente de la mezcladora mecánica (instalación mezcladora adaptada al laboratorio de asfalto espumado WLB 10);
- Agregue el porcentaje requerido en masa de cal y/o de cemento de acuerdo con la fórmula:

$$M_{\text{Cement}} = \frac{C_{\text{Add}}}{100} \times [M_{\text{Sample}} \times (1 + \frac{C_{\text{Add}}}{100})]$$

[fórmula A 2.3.1]

Donde M_{Cement} = Masa de cal o cemento que debe agregarse [g]
 M_{Sample} = Masa seca de la muestra [g]
 C_{Add} = Porcentaje de cal o cemento requerido [% en masa]

(Las siguientes tasas de aplicación de cal o cemento deberán utilizarse como guía :

- donde el IP de la muestra es superior a 10 pero inferior a 16, agregue 1% de cal hidratada;
- donde el IP es 16 ó superior, agregue un 2% de cal hidratada;
- donde el IP es 10 ó inferior, agregue 1% de cemento Portland normal)
- reduzca el contenido óptimo de agua por razones de mezcla óptima conforme a la fórmula A2.3.2 y agregue agua a la muestra conforme a la fórmula A2.3.3.

$$W_{\text{Add}} = W_{\text{OMC}} - W_{\text{Moist}} - W_{\text{Reduc.}}$$

[fórmula A 2.3.2]

$$M_{\text{Water}} = \frac{W_{\text{Add}}}{100} \times (M_{\text{Sample}} + M_{\text{Cement}})$$

[fórmula A 2.3.3]

Donde W_{Add} = Contenido de agua que debe agregarse a la muestra [% en masa]
 W_{OMC} = Contenido óptimo de humedad [% en masa]
 W_{Moist} = Contenido de humedad en la muestra [% en masa]
 $W_{\text{Reduc.}}$ = Reducción del contenido de agua conforme la figura A2.2 para el contenido óptimo de humedad de la mezcla = $(0,3 \times W_{\text{OMC}}) - 0,6$ [% en masa]
 M_{Water} = Masa de agua que debe agregarse [g]
 M_{Sample} = Masa seca de la muestra [g]
 M_{Cement} = Masa de cal o cemento agregada [g]

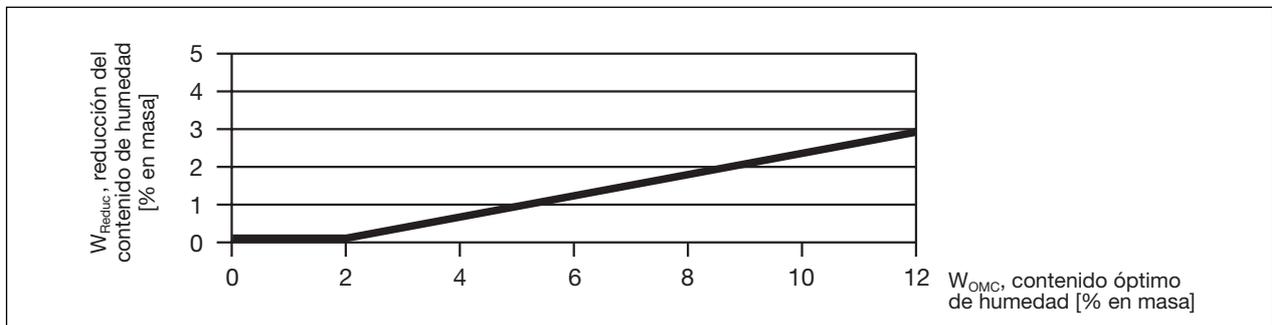


Fig. A2.2: Reducción del contenido de humedad para el contenido óptimo de humedad de la mezcla

Nota. Si se agrega un 2% de cal hidratada para reducir la plasticidad (donde el IP de la muestra es superior a 16) mezcle a fondo en la mezcladora mecánica, después de haber agregado agua, hasta que esté uniforme. Después coloque la muestra en un recipiente sellado y déjelo reposar durante 24 horas antes de continuar.

Tratamiento con asfalto espumado

- agregue asfalto espumado a la muestra conforme a la fórmula A2.3.4:

$$M_{\text{Bitumen}} = \frac{B_{\text{add}}}{100} \times (M_{\text{Sample}} + M_{\text{Cement}})$$

[fórmula A 2.3.4]

Donde M_{Bitumen} = Masa de asfalto espumado que debe agregarse [g]
 B_{add} = Contenido de asfalto espumado [% en masa]
 M_{Sample} = Masa seca de la muestra [g]
 M_{Cement} = Masa de cal o cemento agregada [g]

- En la instalación mezcladora adaptada al laboratorio de asfalto espumado WLB 10 de Wirtgen ponga el cronómetro conforme a la siguiente fórmula:

$$T = \text{factor} \times \left(\frac{M_{\text{Bitumen}}}{Q_{\text{Bitumen}}} \right)$$

[fórmula A 2.3.5]

Donde T = Tiempo que se debe poner en el cronómetro WLB 10 [s]
 M_{Bitumen} = Porcentaje de asfalto que debe agregarse [% en masa]
 Q_{Bitumen} = Caudal de asfalto para el WLB 10 [g/s]
factor = Compensación del asfalto perdido en el brazo mezclador y en el recipiente de la mezcladora (la experiencia ha demostrado que el factor 1,25 da resultados aceptables)

- Coloque la mezcladora mecánica junto a la unidad de espumado, de tal manera que el asfalto espumado pueda descargarse directamente dentro del recipiente de mezclado;
- Mezcle el material y el agua en el recipiente de mezcla hasta que quede uniforme;
- Sin parar la mezcladora, descargue la masa requerida de asfalto espumado dentro del recipiente de mezclado.
- Continúe mezclando durante 30 segundos adicionales;
- Transfiera el material tratado con asfalto espumado a un recipiente sellado;
- Repita el anterior procedimiento para obtener cinco muestras de material tratado con los contenidos requeridos de asfalto espumado. Las muestras se encuentran listas para la fabricación de briquetas.
- Determine el contenido de asfalto de cada muestra tratada con asfalto espumado. El contenido de asfalto espumado agregado será la diferencia entre el contenido de asfalto después del tratamiento menos el contenido de asfalto antes del tratamiento.
- Procedimiento para la compactación de las probetas (manufactura de las briquetas)
 - Prepare el molde y el martillo Marshall limpiando el molde, el collar, el plato de base y la cara de la zapata del martillo de compactación;
 - Coloque un disco de plástico o de papel en el fondo del molde;
 - Pese suficiente material para obtener una altura de la probeta compactada de $63,5 \pm 1,5$ mm (normalmente 1150 g son suficientes). Con una espátula punce la mezcla, quince veces alrededor de su perímetro y diez veces distribuidas sobre el área restante, dejando la superficie ligeramente redondeada;
 - Compacte la mezcla aplicando 75 golpes con el martillo de compactación, teniendo cuidado de permitir la caída libre del mismo;
 - Retire el molde junto con su collar del pedestal de compactación, inviértalo y colóquelo de nuevo aplicando presión de tal manera que descansa firmemente sobre el plato de base;
 - Compacte la otra cara aplicando nuevamente 75 golpes.

- Curado
 - Después de la compactación, retire el plato de base y permita que la probeta se cure durante 24 horas dentro del molde a la temperatura del cuarto, antes de su extracción con un dispositivo apropiado;
 - Coloque las probetas sobre una bandeja plana y cúrelas en un horno de ventilación forzada a 40°C durante 72 horas.

- Densidad seca

Calcule la densidad seca de la probeta compactada mediante la fórmula A2.3.6

$$D = \frac{100}{(W_{\text{Moist}} + 100)} \times \frac{4 \times M_{\text{Briq.}}}{(\pi \times d^2 \times h)} \times 1000$$

[fórmula A 2.3.6]

Donde	D	= Densidad seca	[kg/m ³]
	W _{Moist}	= Contenido de humedad en la muestra durante la compactación	[% en masa]
	M _{Briq.}	= Masa de briqueta inmediatamente después de la compactación	[g]
	h	= Altura promedio de briqueta	[cm]
	d	= Diámetro de briqueta	[cm]

Nota. $\frac{100}{(W_{\text{Moist}} + 100)}$ es el factor usado para convertir la densidad húmeda en densidad seca.

Excluya para ensayos posteriores cualquier briqueta cuya densidad seca difiera del promedio del lote en mas de 50 kg/m³.

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

El ensayo ITS estándar se usa para evaluar las resistencias de las probetas tanto en condición seca como en condición saturada. La ITS se determina midiendo la carga última, hasta alcanzar la falla, de una probeta que se somete a una velocidad de deformación constante de 50,8 mm/minuto sobre su eje diametral. El procedimiento es como sigue:

- Antes del ensayo, deje las probetas a la temperatura del cuarto durante toda la noche;
- Mida la altura de cada probeta en cuatro puntos uniformemente espaciados alrededor de la circunferencia y calcule la altura promedio, L (m);
- Mida el diámetro de cada probeta, D (m);
- Antes del ensayo, coloque las probetas en una cabina de aire a 25°C ± 1°C, como mínimo por una hora, pero no por más de dos horas;
- Retire una probeta de la cabina de aire, y colóquela en el aparato de carga;
- Ajuste las mordazas de carga sobre la probeta, de tal manera que se encuentren paralelas y queden centradas sobre el plano diametral vertical;
- Coloque el plato de transferencia de carga sobre la mordaza superior y centre todo el sistema ensamblado bajo el pistón de la máquina de ensayo de compresión;
- Aplique la carga sobre la muestra, sin impacto violento, a una velocidad de desplazamiento de 50,8 mm por minuto hasta alcanzar la carga máxima;
- Registre la carga P (en kN), con aproximación a 0,1 kN.

Para determinar la ITS de las probetas saturadas, use el siguiente procedimiento antes de su ensayo:

- Coloque la probeta curada en un desecador con salida para vacío y cúbrala con agua a 25°C ± 1°C;
- Aplique un vacío de 50 mm de mercurio durante 60 ± 1 minutos, iniciando este período una vez que se haya alcanzado la presión de vacío necesaria. Si no se dispone de un desecador con salida para vacío, sumerja las probetas en agua a 25°C ± 1°C, durante 24 horas;
- Retire las probetas, séquelas superficialmente y ensáyelas para determinar la carga de tensión última, como ya se describió.

Calcule la ITS para cada muestra con aproximación a 1 kPa, con la fórmula A2.3.7:

$$ITS = \frac{2 \times P}{\pi \times h \times d}$$

[fórmula A 2.3.7]

Donde	ITS = Resistencia a la tensión indirecta	[kP]
	D = Diámetro promedio de la probeta	[m]
	h = Carga máxima aplicada	[kN]
	d = Altura promedio de la probeta	[m]

La ITS retenida (Retained ITS) es la relación entre la ITS seca (Dry ITS) y la saturada (Soaked ITS) para un contenido específico de asfalto:

$$\text{Retained ITS} = \frac{\text{Soaked ITS}}{\text{Dry ITS}}$$

[fórmula A 2.3.8]

- Determinación del contenido de asfalto de diseño

Para todas las muestras (tanto secas como saturadas), realice un gráfico de la ITS medida contra el contenido de asfalto (asfalto incorporado). El contenido de asfalto incorporado para el cual la ITS de las muestras saturadas es máxima se toma como el contenido de asfalto de diseño, para la mezcla tratada con asfalto espumado.

A2.3.4 Determinación de propiedades adicionales de la mezcla con el contenido de asfalto de diseño

Cuando se requiera pueden hacerse ensayos adicionales sobre la mezcla fabricada con el contenido de asfalto de diseño, tales como ensayos de módulo resiliente y de creep dinámico. Estos resultados son útiles para el diseño estructural de las capas construidas con materiales tratados con asfalto espumado. Para llevar a cabo estos ensayos, deberán fabricarse y curarse probetas adicionales con el contenido de asfalto de diseño, de la manera descrita anteriormente.

A2.4 Aparatos de laboratorio necesarios para diseñar mezclas de materiales estabilizados con cemento

A2.4.1 Resumen del equipo necesario

- Un cuarto húmedo de curado capaz de mantener una humedad relativa del 95 al 100 % a una temperatura de 22 a 25°C, o bolsas plásticas adecuadas para guardar las probetas y mantenerlas en una condición hermética al aire, dentro de un baño de agua, como se describe más adelante.
- Baño de agua termostáticamente controlado, capaz de mantener una temperatura de 22 a 25°C.
- Máquina para ensayo de compresión, capaz de aplicar carga a una velocidad de 140 kPa/s, equipada con un dispositivo para medir una carga de 200 kN, con precisión de 1 kN.
- Moldes de compactación de tipo partido, con dos a tres segmentos, de 152,4 mm de diámetro y 152,4 mm de altura con collar de extensión, plato de base y disco espaciador de 25,4 mm de espesor fijo al plato de base, o moldes de compactación de 152,4 mm de diámetro y 152,4 mm de altura con un collar de extensión y plato de base con un disco espaciador fijado al mismo, de 25,4 mm de espesor y un gato de extracción apropiado para retirar las probetas de los moldes. En ambos casos, el plato de base debe fijarse a un bloque de concreto de espesor mínimo de 150 mm y peso de 200 kg como mínimo.
- Un pisón de 4536 g \pm 20 g y diámetro de 50,8 mm \pm 1,0 mm, con un mango para lograr una caída de 457,2 \pm 2 mm.
- Una regla de acero de aproximadamente 300 mm de longitud con borde biselado.
- Cuarteadores.
- Balanza para pesar hasta 15 kg, con precisión de 5 g.
- Balanza para pesar hasta 2 kg, con precisión de 0,1 g.
- Martillo de acero o un triturador pequeño de laboratorio.
- Tamices: desde 0,075 hasta 37,5 mm.
- Mortero y mano de mortero de hierro y una mano de mortero con extremo de caucho.
- Ollas, de 350 mm de diámetro, aproximadamente.
- Ollas para mezclado, de 500 mm de diámetro, aproximadamente.
- Pala de jardinero.
- Espátula.
- Recipientes adecuados para contener del orden de 1000 g de material para determinar los contenidos de humedad.
- Horno de secado, controlado termostáticamente y capaz de mantener una temperatura de 105 a 110°C.
- Probetas graduadas, de 1000 y 500 ml de capacidad.
- Frascos para rociar agua.
- Filtros de papel, 150 unidades circulares.
- Recipientes para mezcla de hierro galvanizado de 450 mm x 650 mm y 200 mm de profundidad (mínimo 3).
- Bandejas adecuadas para colocar las probetas.
- Recipientes con tapa, herméticos de 20 litros de capacidad, aproximadamente (mínimo 4).
- Placas de vidrio de 180 mm x 180 mm y 7 mm de espesor, aproximadamente.
- Grasa lubricante.
- Pipeta de 5 ml.
- Termómetro con rango de 0 a 50°C.

Descripción	Cantida
Recipientes herméticos	
(a) 20 litros (CBR)	20
(b) 10 litros	20
Depósito de rechazo	1
Carretilla de ruedas	1
Lona de 2 m x 2 m	5
Escobas	
(a) Dura	2
(b) Blanda	1
Guantes (asbesto)	1
Baño para inmersión moldes CBR (1 m x 1m x 0,5 m)	3
Moldes (partido: entero)	3
Baño de agua (termostático)	1
Balanza (mecánica)	
(a) 2610 g	2
(b) 20 kg	1

A2.5 Aparatos de laboratorio necesarios para diseñar mezclas de materiales tratados con emulsión asfáltica o con asfalto espumado

A2.5.1 Resumen del equipo necesario

Los diseños de mezclas con asfalto espumado requieren una unidad de laboratorio capaz de producir la espuma a una velocidad comprendida entre 50 y 200 gramos por segundo. El método de producción tiene que simular de la mejor manera posible la producción de la espuma a gran escala. El aparato debe tener una caldera controlada termostáticamente capaz de mantener una masa de 10 kg de asfalto, a una temperatura entre 150 y 205°C, dentro de un rango de $\pm 5^\circ\text{C}$. Adicionalmente, el aparato ha de incluir un suministro de aire comprimido a baja presión de 0 a 500 kPa, con precisión de ± 25 kPa. La planta debe tener un sistema para la incorporación de agua fría al cemento asfáltico caliente, que permita su variación en el intervalo de 0 a 5% (con respecto a la masa de asfalto), con una precisión del 0,2%. La planta debe diseñarse de tal manera que la espuma pueda descargarse directamente dentro del recipiente de mezclado, de 10 kg de capacidad, adaptado a una mezcladora eléctrica de laboratorio.

La planta de laboratorio Wirtgen WLB 10 cumple con los anteriores requerimientos y se diseñó especialmente para simular la producción de asfalto espumado en el campo, que se logra con una máquina WR 2500, 2200 CR o con la planta KMA 150.

- Moldes de compactación tipo Marshall, de 101,6 mm \pm 0,5 mm de diámetro y 87,3 mm \pm 1 mm de altura, con platos de base y collar de extensión ajustables a los moldes.
- Martillo de compactación Marshall con base plana circular de diámetro 98,5 mm \pm 0,5 mm, peso de 4,636 g \pm 5 g y altura de caída libre de 457 mm \pm 3 mm. El uso de un martillo mecánico es opcional.
- Un pedestal de compactación consistente en una pieza prismática de madera de 203 mm x 203 mm x 457 mm, provista en su parte superior de una platina de acero cuadrada de 305 mm de lado. El pedestal ha de instalarse en tal forma que quede a plomo y su superficie nivelada, y además debe contar con una guía vertical rígida para el martillo. El prisma de madera tiene que asegurarse a una placa de concreto sólida.
- Un sostenedor del molde, de diseño adecuado para asegurar el molde en su lugar durante el proceso de compactación.
- Un extractor de probetas con diseño adecuado para retirar las briquetas de dentro del molde, sin causarles daño.
- Una balanza de 5 kg de capacidad, sensibilidad de 1 g.
- Espátula con una cuchilla de 150 mm de longitud.
- Una máquina para ensayos de compresión, capaz de aplicar una carga de mínimo 20 kN a una velocidad de 50,8 mm por minuto, provista de un dispositivo para medir la carga, de capacidad mínima de 15 kN y sensibilidad de 0,1 kN.
- Una cabina de aire capaz de mantener una temperatura de $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$.
- Dos franjas de carga, de acero endurecido de 13 mm \pm 0,1 mm de ancho, superficie cóncava de radio de curvatura de 51 mm \pm 1 mm y longitud mínima de 70 mm. Los bordes agudos de los lados de cada franja de carga que se encuentra en contacto con la probeta deberán redondearse ligeramente. Las franjas de carga tendrán que montarse en un marco con diseño adecuado que permita su alineación sobre la probeta de ensayo.
- Un plato de acero, de sección circular a cuadrada, para transferir la carga de la máquina de compresión a la franja superior, sin presentar deformación. Su dimensión debe ser tal que cubra como mínimo la longitud de la muestra que ensayará.
- Calibradores para medir la longitud y el diámetro de las probetas de ensayo, con aproximación de 0,5 mm.
- Grasa de silicona o aceite (por ejemplo, stop - cock grasa).
- Un desecador con salida para vacío u otro recipiente apropiado y una bomba de vacío capaz de reducir la presión a menos de 50 mm de mercurio, conectada a un manómetro.
- Un termómetro capaz de medir una temperatura entre 0 y $50^\circ\text{C} \pm 0,2^\circ\text{C}$.

A2.5.2 Lista detallada

Descripción	Cantida	Descripción	Cantida
Tamices		Balanzas (electrónicas)	
(a) 53,0 mm Diámetro 200 mm	1	(a) 5 - 8 kg / 0,1 g	1
(b) 37,5 mm “ “ “	1	(b) 2 kg / 0,01 g	1
(c) 26,5 mm “ “ “	1	Bomba de vacío	1
(d) 19,0 mm “ “ “	1	Baño de agua para RD (termostático)	1
(e) 13,2 mm “ “ “	1	Ollas	
(f) 9,5 mm “ “ “	1	(a) 400 mm de diámetro	2
(g) 6,7 mm “ “ “	1	(b) 500 mm de diámetro	1
(h) 4,75 mm “ “ “	1	Bandejas: 350 x 250 mm (s/acero)	10
(i) 3,35 mm “ “ “	1	Frasco de vacío, 2 l	4
(j) 2,36 mm “ “ “	1	Varilla de agitación	1
(k) 1,18 mm “ “ “	1	Centrífuga	1
(l) 0,600 mm “ “ “	1	Equipo Marshall	
(m) 0,425 mm “ “ “	1	Compactador mecánico Marshall	1
(n) 0,300 mm “ “ “	1	Prensa Marshall	1
(o) 0,150 mm “ “ “	1	Moldes Marshall	8
(p) 0,075 mm “ “ “	2	Plato de base Marshall	2
(s) Fondo “ “ “	1	Collar de extensión Marshall	1
(t) Tapa “ “ “	1	Gato para extracción	1
(u) Tamizadora mecánica de agitado	1	Vasos centrífugos	4
Mallas		Ventilador eléctrico	1
Malla (de 37 mm de abertura)	1	Manómetro de punta cerrada	1
Fondo de malla (de 37 mm de abertura)	3	Cronómetro / temporizador	
Malla (de 25 mm de aberturas)	1	(a) Temporizador	1
Fondo de malla (de 25 mm de abertura)	3	(b) Digital (electrónico)	1
Bandeja calentadora (eléctrica)	3	Vasos de precipitado (s/acero)	
Mecheros de gas + platos de asbesto	2	(a) 2000 ml	1
Hornos para secado (eléctricos)		(b) 600 ml	1
(a) 400 litros	1	Contenedores para muestras aisladas	2
(b) 40 litros	1	Pipetas (100 ml)	1
Estantes adicionales		Botella de lavado	2
(a) 400 litros	3		
(b) 40 litros	3		

Descripción	Cantida
Termómetros	
(a) De vidrio 0 - 50 °C	1
(b) De vidrio 0 - 200 °C	1
(c) De tipo dial (Tel – Tru)	1
(d) Digital (electrónico)	1
(e) De carátula	1
Equipos de medición	
Regla metálica (300 mm)	1
Cinta de medición	
(a) 30 m	1
(b) 3 m	1
Cepillos	
(a) De bronce o cobre	1
(b) De cerda dura	1
(c) Pintura 50 - 100 mm	1
(d) Pintura 25 - 50 mm	1
Palas de jardín	2
Cuchara	1
Espátula 200 x 20 mm	2
Calibrador	1
Embudos	
(a) De vidrio	1
(b) Metálico	1
Bomba de combustible (operada manualmente)	1
Contenedores de plástico (20 l)	1
Mechero Bunsen	1
Tuberías de goma	2
Guantes	
(a) Caucho	2
(b) Asbesto	1
Baño de agua (termostático: Marshall)	1
Dispositivo para fallar ITS	1



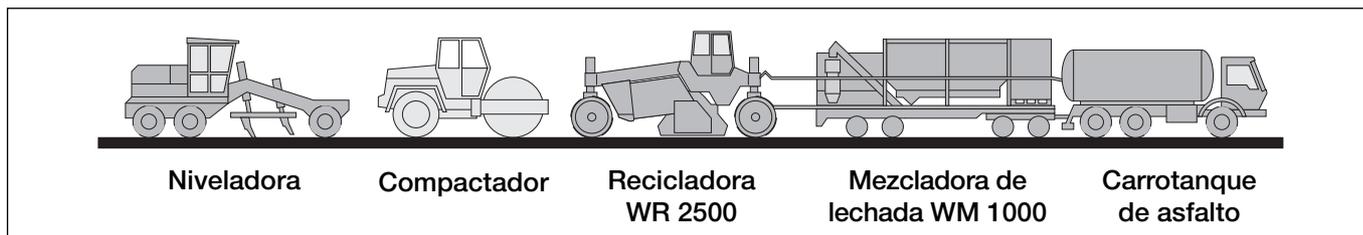
Apéndice 3

Otros equipos necesarios para el procesamiento de material reciclado

A3.1	Compactadores	129
A3.2	Niveladoras	129
A3.3	Esparcidores	130
A3.4	Mezcladoras de lechada	130
A3.5	Carrotanques	131
A3.6	Otros	132

En este apéndice se tratan en detalle las partes de la planta y los equipos, diferentes de la máquina recicladora principal, que se necesitan para el reciclaje.

A3.1 Compactadores



A3.1.1 Compactadores vibratorios con tambor de acero

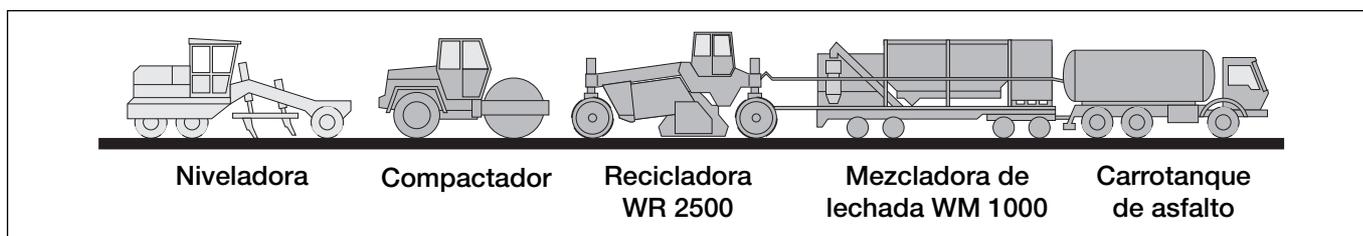
Al compactar un material estabilizado, el objetivo es reducir los huecos llenos de aire y agua, incrementando la densidad y, por lo tanto, la capacidad portante de una capa. Para la compactación de capas estabilizadas, normalmente se emplean compactadores monotambor en combinación con compactadores de neumáticos. Cuando se seleccionen el tipo y el tamaño del compactador, deben tenerse en cuenta los siguientes aspectos:

- Peso/tamaño del compactador;
 - 10 t a 15 t de masa estática para compactar capas recicladas hasta de 200 mm de espesor;
 - 15 t a 20 t de masa estática para compactar capas recicladas entre 200 y 400 mm de espesor;
- Frecuencia y amplitud
 - Frecuencia de vibración entre 29 y 35 Hz;
 - Amplitud de frecuencia entre 0,91 y 1,66 mm;
 - Amplitud grande/frecuencia baja para la compactación inicial, penetración profunda de energía;
 - Pequeña amplitud/frecuencia alta para la compactación final, penetración poco profunda de energía.

A3.1.2 Compactadores de llantas neumáticas

- De 12 a 30 t de masa estática;
- De cuatro ruedas mínimo, tanto al frente como en la parte trasera;
- Un traslape mínimo de 50 mm de cada trayectoria de las ruedas; y
- Distribución uniforme de la carga sobre cada llanta.

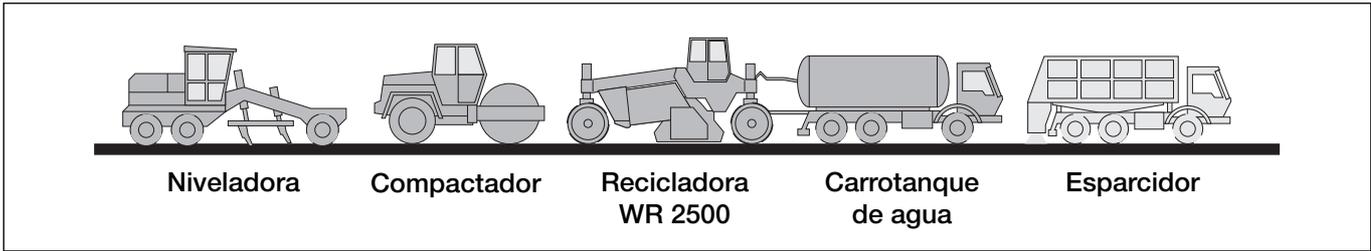
A3.2 Niveladoras



Éstas deben ser lo suficientemente potentes para esparcir, colocar y nivelar el material reciclado. Las siguientes especificaciones pueden usarse como guía:

- Motor de potencia de 100 kW;
- Cuchilla de 3,66 m de longitud, con bordes reemplazables;
- Altura de la cuchilla de 610 mm; y
- Controles hidráulicos para una velocidad constante de ubicación de la cuchilla.

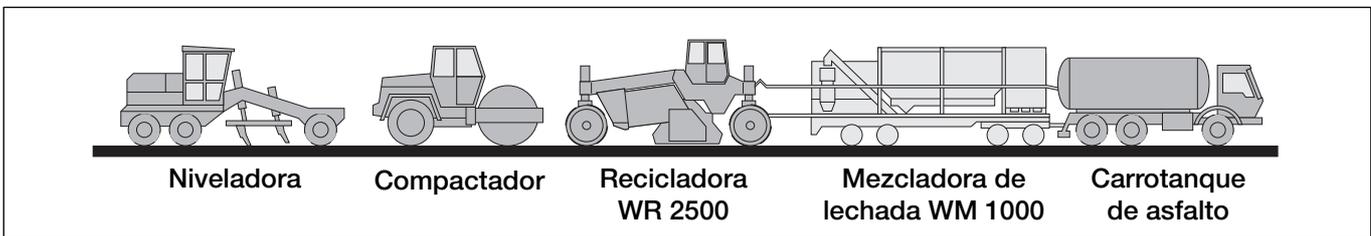
A3.3 Esparcidores



Para aplicar agentes estabilizadores secos en polvo sobre la superficie de una carretera, existen diversos tipos de esparcidores. Los aspectos más importantes de estos equipos son:

- Ancho variable para abastecer los diferentes anchos de reciclaje (traslapos);
- Capacidad de calibrarse (kg/m^2) para producir una tasa precisa de esparcido; y
- Capacidad suficiente (t) para cubrir la demanda de la operación de reciclaje.

A3.4 Mezcladoras de lechada



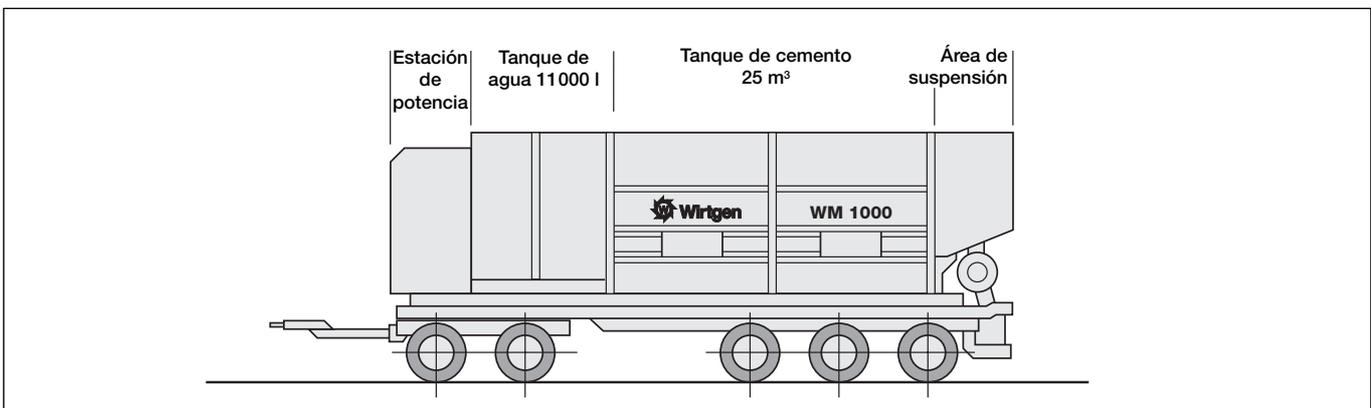
La mezcladora de lechada WM 1000 generalmente se emplea cuando las condiciones del sitio demandan:

- Un alto grado de precisión en la tasa de aplicación del cemento; y/o
- La no contaminación debida al cemento transportado por el viento (por ejemplo, en ambientes urbanos).

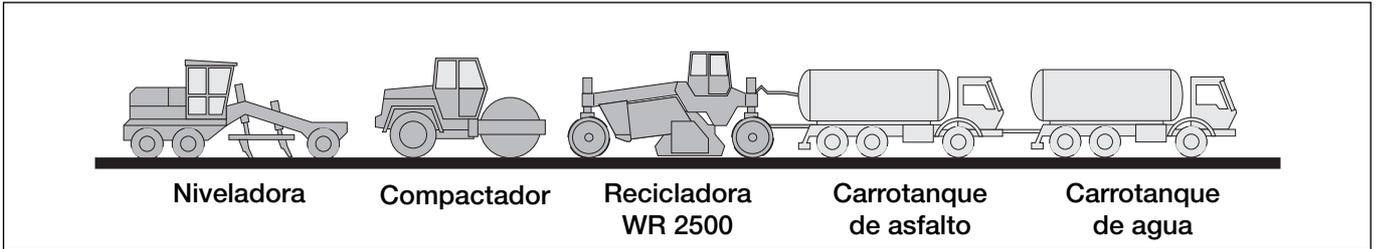
En un tren de reciclaje compuesto de asfalto/cemento, la WM 1000 siempre debe colocarse inmediatamente al frente de la 2200 CR o de la WR 2500, siendo el carrotanque de asfalto el vehículo que encabeza el tren.

La WM 1000 tiene una salida máxima de mil litros de lechada de agua/cemento por minuto, capacidad que satisface la demanda de una máquina WR 2500 para estabilizar una capa de 300 mm de espesor, con 4 % de cemento, a una velocidad de avance superior a 10 m/min.

Las siguientes son las partes principales de una máquina WM 1000:



A3.5 Carrotanques



A3.5.1 Carrotanques de agua

La mayor parte de las operaciones de reciclaje, que incluyen agentes estabilizadores, necesitan la adición de agua para alcanzar el contenido de humedad para la cual se obtiene la compactación requerida. (El agua necesaria para espumar un asfalto es diferente del agua que normalmente se requiere para la compactación. En el primer caso solamente se usa agua potable, que es suministrada por el tanque de agua de la WR 2500 o de la 2200 CR.)

Pueden emplearse carrotanques de configuraciones muy distintas para el suministro de agua, pero todos deben cumplir con los siguientes requerimientos:

- La capacidad mínima del tanque varía de acuerdo con la operación particular, pero por lo general la tasa de producción y la demanda de agua son bastante altas. Para evitar costosos tiempos de espera, debe balancearse la capacidad del carrito de agua con las necesidades del tren de reciclaje, la profundidad del reciclaje, el contenido de humedad del material in situ y con la distancia a la fuente de agua.

Independientemente del tipo de estabilizador que se use, en muchos de los proyectos se requieren como mínimo dos carrotanques de 10.000 litros para suministrar el agua de compactación; mientras uno se encuentra acoplado al tren, el otro se llena en la fuente adecuada de agua más cercana.

- Bombas para el llenado de agua, de 500 litros/minuto de capacidad mínima.
- Las mangueras para suministro varían de acuerdo con la configuración del tren de reciclaje. Usualmente el carrito de agua es el primer vehículo del tren y, por tanto, la manguera de suministro de este líquido es la más larga. Para prevenir la interrupción del flujo, el diámetro interno mínimo de todas las mangueras de suministro debe ser de 100 mm. Las mangueras tienen que ser flexibles y no colapsar bajo succión.
- Durante la operación del reciclaje, la alta frecuencia en los cambios de carrotanques de agua demanda que en todas las conexiones se tengan acoples de retiro rápido.

A3.5.2 Carrotanques de asfalto

Todos los tipos de agentes estabilizadores asfálticos necesitan carrotanques para alimentar la recicladora, los cuales deben seleccionarse cuidadosamente con el objeto de evitar problemas. A menudo, el transporte de asfalto lo realizan terceros (por ejemplo un transportador subcontratista), quienes pueden tener diferentes tipos de carrotanques, algunos de ellos adecuados para trabajar como parte de un tren de reciclaje y otros no. Los carrotanques de asfalto deben cumplir con las siguientes especificaciones:

- Ser una unidad sencilla o la combinación de una unidad sencilla montada sobre un remolque con una capacidad mínima del tanque de 10.000 litros, o del doble, preferiblemente. Para proyectos de alta producción, deben considerarse tanques con capacidades superiores a los 20.000 litros,

- No tener escapes, tanto del mismo tanque como de la fontanería de la válvula de salida;
- Contar con una válvula de salida de mínimo 75 mm de diámetro interno cuando se encuentra completamente abierta y fija a la parte posterior del carrotanque, capaz de drenarlo completamente;
- Tener un adaptador “estándar” sobre la tubería de salida para acoplar la tubería de alimentación a la recicladora;
- Instalar bloques de avance y sujetadores de remolque tanto en el frente como en la parte posterior, para permitir que el carrotanque se sitúe en el centro del tren;
- Debe contarse con una barra sumergible calibrada, capaz de medir el contenido del tanque con una precisión de aproximadamente cien litros; y
- Poseer un termómetro calibrado para indicar la temperatura del material a un tercio del fondo del tanque.

Cuando se estabiliza con asfalto espumado, pueden aplicarse las siguientes consideraciones adicionales:

- Revestimiento completo para un aislamiento efectivo; y
- Un sistema de calentamiento capaz de incrementar la temperatura del contenido del tanque por lo menos 10 °C por hora, cuando éste se encuentra por debajo de los 100 °C.

A3.6 Otros

A3.6.1 Mangueras

Para los diferentes aditivos, tales como las lechadas de cemento, emulsiones asfálticas o cementos asfálticos calientes para espumado, se requieren mangueras por separado. Resulta vital contar con acoples para el rápido retiro de los diferentes ítems de la planta y de las respectivas mangueras, ya que esto asegurará que los retrasos sean mínimos y además mejorará la seguridad del personal.

La tubería de alimentación para conectar el carrotanque con cemento asfáltico caliente a la recicladora es crítica. Debido a esto, dicha pieza importante de los equipos complementarios ha de cumplir con las siguientes especificaciones mínimas:

- Estar construida con un material de acero flexible que pueda calentarse con un soplete para retirar cualquier tipo de obstrucción que aparezca por enfriamiento;
- Tener acoples correctos en cada uno de sus extremos para la conexión del carrotanque a la recicladora, que cumplan con todas las especificaciones de seguridad;
- Tener un diámetro interno mínimo de 75 mm; y
- La longitud suficiente para permitir que el carrotanque gire con respecto a la recicladora, sin lentitud excesiva. El carrotanque de asfalto siempre será el vehículo guía cuando una mezcladora de lechada WM 1000 esté incorporada en el tren de reciclaje. Para tal configuración se necesitarán dos tuberías de alimentación, una de ellas para acoplar el carrotanque a la tubería de transferencia de la mezcladora de lechada y la otra para acoplar la mezcladora de lechada a la máquina recicladora.

A3.6.2 Barras de compresión

Éstas deben ser lo suficientemente fuertes para evitar que se doblen bajo las altas fuerzas de compresión que se desarrollan entre los diferentes componentes de la planta que se encuentran acoplados. Una de estas barras se suministra como equipo estándar con la WR 2500 o la 2200 CR.

A3.6.3 Barras de tensión

Pueden ser en forma de cadenas o de caucho sintético, pero con la resistencia suficiente para soportar las elevadas fuerzas de tensión que se desarrollan entre los diferentes componentes de la planta.

Apéndice 4

Especificaciones estándar para el reciclaje en frío in situ

A4.1 Alcance	137
A4.2 Materiales	137
A4.3 Planta y equipos	138
A4.4 Construcción	139
A4.5 Protección y mantenimiento	145
A4.6 Tolerancias de construcción	145
A4.7 Inspección y ensayos de rutina	146
A4.8 Medida y pago	146
Ejemplo de un cuadro típico de cantidades	149

Este apéndice contiene una serie completa de especificaciones, las cuales rigen todos los requerimientos de la construcción de una nueva capa de pavimento mediante el reciclaje del material in situ. Su alcance es bastante amplio, debido a que trata de cubrir los conceptos generales del proceso de reciclaje en frío in situ, de donde se deriva el uso del término “estándar”.

Se prevé que las especificaciones estándar estarán incorporadas dentro de los documentos del contrato junto con especificaciones semejantes requeridas en un proyecto de rehabilitación para los diferentes elementos de trabajo, los cuales incluyen la provisión de facilidades adicionales de drenaje, la construcción de capas asfálticas, la acomodación del tráfico y otras operaciones que se encuentran normalmente asociadas a la rehabilitación de pavimentos.

Los conceptos de todas las especificaciones estándar son amplios y requieren ajustarse a cada proyecto en particular. Por esta razón los documentos del contrato contienen las “especificaciones del proyecto”, las cuales detallan las necesidades específicas del mismo. Las especificaciones estándar se refieren a las especificaciones del proyecto, y es obligación de los autores de los documentos del contrato asegurarse de que tales referencias se cumplan dentro de las especificaciones del proyecto en cuestión.

A4.1 Alcance

Estas especificaciones estándar cubren todas las labores relacionadas con la construcción de una capa de pavimento nueva, con el uso predominante de material reciclado de las capas superiores de la vía existente. El trabajo incluye:

- La rotura y la recuperación del material existente en las capas superiores del pavimento;
- El cambio en la gradación del material recuperado mediante la incorporación de material importado;
- La consecución, suministro y mezcla con los agentes estabilizadores y el agua; y
- La colocación y la compactación para alcanzar una capa nueva del pavimento.

Dichas especificaciones son amplias y necesitan ajustarse cuando se apliquen a un proyecto en particular. Para complementarlas o mejorarlas, se incluyen numerosas referencias a las “Especificaciones del proyecto”, las cuales forman parte de los documentos del contrato.

Los requerimientos del producto final del reciclaje están contenidos tanto en las especificaciones estándar como en las especificaciones del proyecto, y será obligación del contratista organizar y ejecutar las operaciones para que estos requerimientos se cumplan.

A4.2 Materiales

A4.2.1 Material in situ

Las investigaciones llevadas a cabo y los resultados de los ensayos realizados sobre muestras representativas de los materiales que se encuentran en la estructura del pavimento se pormenorizarán en las especificaciones del proyecto, o se emitirán por separado. Allí se incluirá como mínimo:

- Una descripción detallada de la estructura del pavimento existente;
- La predicción de la gradación, plasticidad y de otras propiedades relevantes de los materiales de las capas superiores del pavimento que se recuperarán mediante el reciclaje; y
- Los contenidos de humedad, en el momento de la investigación.

Esta información se ofrece de buena fe, pero en las circunstancias relativas a los procedimientos de toma de muestras y al tipo de información su-

ministrada no puede garantizarse que todos los datos sean correctos o representativos de las condiciones in situ, en el momento de la construcción. Por consiguiente, el contratista deberá asumir esto bajo su propio riesgo, y realizar por separado un programa de ensayos para determinar las condiciones prevalecientes en el momento de la construcción.

A4.2.2 Material natural importado

Para la mezcla con el material reciclado pueden necesitarse materiales naturales (arena, grava) o productos de trituración (materiales gradados, polvo de trituración), con los siguientes propósitos:

- Alterar la gradación del material obtenido después del reciclaje;
- Modificar sus propiedades mecánicas;
- Complementar el material reciclado para corregir la forma de la superficie.

En las especificaciones del proyecto se detallarán los requerimientos de los materiales de importación.

A4.2.3 Agentes estabilizadores

En los agentes estabilizadores se incluyen tanto los de tipo químico como los de tipo bituminoso. Los requerimientos de un agente estabilizador en particular o de la combinación de agentes que se emplearán, se pormenorizarán en las especificaciones del proyecto.

A4.2.3.1 Agentes estabilizadores químicos

Los agentes estabilizadores serán uno o más de los siguientes:

- **Cal.** Deberá cumplir con los requerimientos de los estándares aplicables a su manufactura.
- **Cemento Portland.** Deberá cumplir con los requerimientos de los estándares aplicables a su manufactura (como BS 12: Cemento Portland y Cemento Portland de endurecimiento rápido). El cemento Portland de endurecimiento rápido no debe usarse como agente estabilizador.
- **Cemento Portland de alto horno.** Deberá cumplir con los estándares relevantes.
- **Otros agentes estabilizadores de tipo químico.** En las especificaciones del proyecto tienen que detallarse los requerimientos para cualquier otro tipo de agente estabilizador químico, como ce-

nizas volantes o concentrados modificadores de suelo (azufrados, solubles en agua).

Nota. Los agentes estabilizadores químicos en polvo deben mantenerse cubiertos y protegidos contra la humedad desde el momento de su recibo hasta su empleo, teniendo en cuenta las recomendaciones del fabricante o de los proveedores. Todas las consignaciones de estos materiales deben usarse en la misma secuencia en que se despacharon al sitio. Los stocks almacenados por más de tres meses no deben usarse en los trabajos sin autorización.

A4.2.3.2 Agentes estabilizadores bituminosos

Los agentes estabilizadores de tipo bituminoso deben cumplir con las especificaciones relevantes que sean aplicables. Puede ser cualquiera de los siguientes:

- Cemento asfáltico de grado de penetración, o
- Emulsión asfáltica.

Todos los agentes estabilizadores bituminosos deben calentarse, almacenarse y aplicarse estrictamente de acuerdo con los requerimientos detallados en las especificaciones del proyecto, y despacharse al sitio en carrotanques que han de tener un “certificado de carga” con la siguiente información:

- Identificación detallada del carrotanque;
- Identificación del producto (por ejemplo, asfalto de grado de penetración 150/200);
- Certificado de la báscula de carga indicando la masa neta del producto;
- Nombre del distribuidor;
- Número del lote y fecha de manufactura;
- Temperatura a la cual se cargó el producto;
- Fecha, hora y lugar de la carga;
- Comentarios sobre el estado del carrotanque en el momento de la carga en términos de limpieza, detalles de la carga transportada anteriormente y si existen residuos de este producto; y
- Detalles de cualquier sustancia química o de otro tipo, agregadas al producto antes, durante o después del proceso de carga (por ejemplo, agentes antistripping).

Nota. En estas especificaciones, las referencias a los “agentes estabilizadores fluidos” deben incluir todas las formas de agentes estabilizadores bituminosos.

A4.2.4 Agua

El agua debe estar limpia y libre de concentraciones dañinas de ácidos, álcalis, sales, azúcares o de otras sustancias orgánicas o químicas. Si el agua usada no se obtiene de una fuente de abastecimiento pública, pueden requerirse ensayos para demostrar si es adecuada o no.

A4.3 Planta y equipos

A4.3.1 Generalidades

Toda planta debe suministrarse y operarse para garantizar que se recicle el material en el sitio hasta la profundidad especificada y se construya una capa nueva en una sola pasada, de acuerdo con los requerimientos de las especificaciones. La planta y el equipo empleado han de tener una capacidad adecuada y encontrarse en buen estado. No se permitirán en el sitio plantas obsoletas, con mantenimiento pobre o dilapidadas.

A4.3.2 Planta para el reciclaje profundo en frío *in situ*

El reciclaje en frío en el sitio deberá efectuarse con una fresadora modificada o con una máquina recicladora para fresar en una sola pasada, hasta la profundidad especificada, el material de las capas superiores en el pavimento existente junto con cualquier material importado y alcanzar la gradación y la consistencia de la mezcla requeridas. Puede suministrarse una máquina por separado para el procesamiento del material fresado, su fraccionamiento por tamaños y su mezcla. La máquina recicladora debe tener como mínimo las siguientes características:

- Capacidad para fresar en una sola pasada, hasta una profundidad mínima de 300 mm. Provista con un sensor automático para mantener de manera precisa la profundidad de corte establecida;
- Un tambor fresador que gire de manera ascendente en la dirección de avance y que alcance como mínimo 2,0 m de ancho de corte en una sola pasada; y
- Un sistema de control de gradación para promover la fragmentación del material que está reciclándose, consistente en una barra o viga ajustable situada al frente del tambor fresador.

Con el objeto de mezclar el material fresado con el agua o con los agentes estabilizadores, la máquina recicladora o la unidad procesadora que se encuentra por separado debe tener las siguientes características:

- Un sistema controlado por microprocesador para regular la aplicación del agua o de los agentes estabilizadores en relación con la velocidad de avance y la masa del material que está reciclándose;
- Un sistema doble de bombeo y de dosificación para aplicar simultáneamente el agua y los agentes estabilizadores fluidos. El sistema de bombeo debe calibrarse para que el suministro tenga una tolerancia de $\pm 3\%$ por volumen;
- Un sistema de autolimpieza de las boquillas que promueva una aplicación uniforme del agua o de los agentes estabilizadores fluidos a través del ancho total del tratamiento. El sistema de aplicación debe ser capaz de ajustarse para los diferentes anchos del tratamiento;
- Cuando el cemento asfáltico espumado se usa como agente estabilizador, el sistema para el espumado del asfalto debe estar equipado con una boquilla de prueba capaz de reproducir una muestra del asfalto espumado que se está inyectando dentro del material reciclado; y
- Cuando la profundidad de fresado supere los 300 mm, el volumen efectivo de la cámara mezcladora debe incrementarse en relación con la profundidad de corte para acomodar el material adicional generado por el aumento en la profundidad de corte.

El material reciclado debe salir de la cámara mezcladora de tal manera que se prevenga su segregación. El esparcimiento y la colocación para formar una capa nueva deben efectuarse con una motoniveladora o con una plancha montada en la parte posterior de la máquina recicladora.

A4.3.3 Compactadores

La compactación del material colocado debe alcanzarse mediante compactadores vibratorios autopropulsados o de llantas neumáticas. La frecuencia y la amplitud de los compactadores vibratorios que superan una masa estática de 15 t deben ser ajustables.

A4.3.4 Carrotanques para el suministro de agentes estabilizadores de tipo bituminoso

Para suministrar los agentes estabilizadores de tipo bituminoso a la máquina recicladora, deben emplearse carrotanques con una capacidad superior a los diez mil litros (10.000 l). Cada uno debe adaptarse con sujetadores de remolque, tipo pin, en sus partes delantera y trasera, permitiendo de esta manera que se empuje desde atrás por la máquina recicladora y, así mismo, que empuje al

carrotanque de agua que se encuentra al frente de él. En el sitio no se permitirán escapes del carrotanque. Adicionalmente, cada uno debe estar equipado con:

- Un termómetro para indicar la temperatura del contenido a un tercio del fondo del tanque;
- Una válvula de alimentación en la parte trasera, con un diámetro interno mínimo de 75 mm cuando se encuentra totalmente abierta, capaz de drenar el contenido del tanque;
- Un recubrimiento en su contorno para retener el calor;
- Un sistema de calentamiento capaz de elevar la temperatura del contenido del tanque como mínimo 20°C por hora; y
- Una barra sumergible calibrada, graduada a intervalos no mayores de cien litros, para medir el contenido del tanque.

A4.4 Construcción

A4.4.1 Limitaciones y requerimientos generales

A4.4.1.1 Limitaciones climáticas

Los trabajos no deben llevarse a cabo durante condiciones de neblina o húmedas ni comenzarse si existe algún riesgo de que no se termine antes que se presenten estas condiciones. Igualmente no deberán ejecutarse si la temperatura ambiente está por debajo de los 5°C. No se permitirá ningún trabajo adicional, además del terminado y la compactación, si la temperatura del aire cae por debajo de los 10°C durante las operaciones.

No se permitirá el esparcimiento sobre la vía de agentes estabilizadores químicos en polvo, delante de la máquina recicladora, cuando se presenten condiciones de viento que afecten la operación.

A4.4.1.2 Acomodación del tráfico

El contratista será responsable del paso confortable del tráfico sobre secciones de vía que tenga ocupadas y tomará en todo momento las precauciones necesarias para proteger al público y facilitar el flujo del tráfico. Las especificaciones del proyecto definirán la cantidad de medidas requeridas para la seguridad del tráfico.

Antes que el trabajo de reciclaje comience deberán cumplirse todos los requerimientos de acomodación del tráfico, detallados en las especificaciones del proyecto.

A4.4.1.3.3 *Determinación del contenido de humedad in situ*

El material que se reciclará deberá ensayarse para establecer su contenido de humedad. La frecuencia de los ensayos se determinará dependiendo de la variabilidad de los resultados iniciales. Como mínimo tienen que extraerse muestras para ensayo cada 2 m sobre una línea a través del ancho de la vía y cada 500 m longitudinalmente o donde se conozca un cambio en el material del pavimento. Los ensayos de contenido de humedad no deberán ejecutarse con más de una semana de anticipación al comienzo de las operaciones de reciclaje en frío in situ. Así mismo, habrá que asegurarse de que las muestras sean representativas del material, haciendo verificaciones cuando se presente clima húmedo entre los ensayos iniciales y el comienzo de los trabajos en cualquier sección.

A4.4.1.4 *Limitaciones de tiempo*

El tiempo máximo entre la mezcla del material reciclado con un agente estabilizador y su compactación se determinará teniendo en cuenta el tipo de agente estabilizador utilizado. Donde se combinan dos o más agentes estabilizadores, el límite lo fijará el agente que requiera menor tiempo:

- **Cemento.** Tres (3) horas;
- **Cal.** Veinticuatro (24) horas si se mantiene húmeda;
- **Emulsión asfáltica.** Antes que la emulsión rompa;
- **Asfalto espumado.** Siete (7) días si se mantiene húmedo;
- **Químicos patentados.** Según instrucciones del fabricante.

A4.4.2 *Requerimientos antes de comenzar el reciclaje*

A4.4.2.1 *Plan de producción*

El contratista preparará, antes de comenzar el trabajo diario, un plan de producción en el que se detallen los objetivos trazados. Allí se incluirán:

- Un esquema que muestre la disposición general del largo y ancho de vía propuesto para reciclar durante el día, despiezado en el número de cortes paralelos requeridos para lograr el ancho establecido y las dimensiones de los traslapes de cada junta entre cortes;
- La secuencia y la longitud de cada corte por reciclar antes de empezar el adyacente o el siguiente;

- El tiempo estimado para el fresado, mezclado y compactado de cada corte. En el esquema deberá mostrarse también el tiempo esperado de culminación del corte;
- El sitio donde se tomaron las muestras para determinar los contenidos de humedad y los resultados de los ensayos;
- La adición de agua propuesta para cada corte y la ubicación en donde debe hacerse cualquier cambio dentro de esa secuencia;
- La localización y cantidad de material que se importará;
- La cantidad y tipo de agente(s) estabilizador(es) que se aplicará(n) en cada corte;
- El programa de ensayos de control propuesto; y
- Cualquier otra información que sea relevante para el trabajo propuesto.

En las especificaciones del proyecto, a menos que se especifique lo contrario, deberán planearse las juntas longitudinales para coincidir con cada uno de los cambios en pendiente transversal a lo ancho de la vía, independientemente de las implicaciones del ancho del traslape.

El agente responsable del contratista mantendrá en la obra el plan de producción.

A4.4.2.2 *Referenciamiento del alineamiento horizontal*

Antes de comenzar cualquier trabajo de reciclaje, el alineamiento horizontal existente debe referenciarse utilizando una serie de estacas colocadas a ambos lados de la vía, pero por fuera del área de trabajo, a una distancia constante de ésta, y formando ángulos rectos con la línea central existente. Después que se terminen las operaciones de reciclaje, deberán utilizarse las estacas para localizar nuevamente la línea central. La distancia entre estacas sucesivas no deberá exceder de 20 m en curvas o de 40 m en rectas.

A4.4.2.3 *Preparación de la superficie*

Antes de comenzar cualquier trabajo, la superficie de la vía que se va a reciclar deberá prepararse de la siguiente manera:

- Limpieza de toda la vegetación, basura y de otro material extraño a lo ancho de la vía, incluyendo cualquier carril adyacente o bermas que no vayan a reciclarse;
- Remoción del agua estancada;
- Fresado preliminar en donde se tengan que re-

mover puntos altos (si se requiere); y

- Señalización clara sobre la superficie de la vía de las líneas de cortes longitudinales propuestas.

El contratista deberá anotar la ubicación de todas las señalizaciones de la vía, como por ejemplo detalles de las líneas de barrera que se destruirán en el proceso de reciclaje.

A4.4.2.4 Requerimientos de forma y nivel

A no ser que se establezca de otro modo en las especificaciones del proyecto, los gráficos de diseño no se expedirán detallando los requerimientos de los niveles finales para la superficie de la vía rehabilitada.

En donde no se deterioren excesivamente la pendiente y la forma de la sección transversal de la vía, el contratista tendrá la responsabilidad de conducir las operaciones de tal manera que los niveles de la superficie, de la capa reciclada terminada, estén de acuerdo con los encontrados antes del reciclaje.

En las especificaciones del proyecto se detallarán los requerimientos del nuevo nivel de la superficie, donde se corrijan defectos o se hagan modificaciones a la pendiente. Lo anterior puede alcanzarse antes del reciclaje mediante fresado para retirar el material o por medio de material importado cuidadosamente esparcido sobre la superficie de la vía.

A menos que se determine lo contrario en las especificaciones del proyecto, debe preservarse la integridad estructural del pavimento existente, limitando la cantidad de material retirado mediante el fresado. Sin recibir previa autorización, el espesor del material removido por fresado no debe exceder de 50 mm.

A4.4.2.5 Adición de material natural importado

En donde las especificaciones del proyecto indiquen el uso de material importado como material de compensación para realizar correcciones de forma, antes del fresado, el material prescrito tiene que importarse y extenderse sobre la superficie de la vía. Los métodos para la colocación y el esparcimiento del material importado deben ser tales que se alcancen los niveles requeridos de la superficie, posiblemente necesitándose el uso de una pavimentadora, de una motoniveladora o de otra planta de este tipo.

Cuando el espesor del material importado exceda la profundidad de fresado propuesta, tendrán que modificarse los requerimientos para la corrección de forma mediante la renivelación de la superficie

sobre cualquier lado del punto bajo.

En donde las especificaciones del proyecto indiquen el uso de material importado con el propósito de alterar la gradación del material después de fresado o efectuar una modificación mecánica, el material prescrito deberá importarse, y:

- Aplicarse sobre la superficie de la vía con un espesor uniforme antes del fresado, como ya se describió; o
- Aplicarse durante el proceso de mezclado después del fresado.

La segunda opción solamente deberá permitirse cuando la configuración de la planta separe el proceso de fresado del de mezclado y permita añadir material importado durante este último. La adición deberá controlarse mediante el mismo sistema con microprocesador que monitorea la velocidad de viaje de la máquina para la incorporación controlada del agua o/y de los agentes estabilizadores fluidos.

El contratista deberá instituir un sistema de control claro para asegurar que la calidad de todos los materiales importados cumple con los requerimientos de las especificaciones del proyecto.

A4.4.2.6 Trabajando con materiales que tienen un alto contenido de humedad

Antes del reciclaje habrá que realizar un tratamiento del material si los resultados de los ensayos muestran que el contenido de humedad in situ supera las limitaciones de humedad descritas en la cláusula A4.4.3.4. Las especificaciones del proyecto describirán los requerimientos de tal tratamiento.

A4.4.3 Adición de agentes estabilizadores

En las especificaciones del proyecto se detallarán el o los tipos de agentes estabilizadores y sus tasas de aplicación, expresadas como un porcentaje de la masa del material que se va a estabilizar.

A4.4.3.1 Agentes estabilizadores químicos

El método de aplicación de los agentes estabilizadores químicos estará a discreción del contratista y posiblemente será:

- Esparcido sobre la superficie de la vía de los agentes estabilizadores en seco, en una capa uniforme, antes del fresado; o
- Fluidificado como una lechada mediante la mezcla con agua y luego bombeado dentro del proceso de mezclado; o
- Mezclado en una planta de cochada y esparcido

sobre la superficie de la vía junto con el material importado, como se describió en la cláusula A4.4.2.5.

Los agentes estabilizadores en seco deberán esparcirse uniformemente sobre el ancho de la vía que se reciclará durante cada paso de la máquina fresadora (o recicladora), ya sea mediante un esparcidor mecánico a la tasa prescrita de aplicación en un proceso continuo o manualmente.

Cuando el esparcimiento se realice manualmente los bultos o las bolsas del agente estabilizador deberán espaciarse, a intervalos iguales, a lo largo de cada corte individual. Además, habrá que vaciar y esparcir uniformemente el contenido de los bultos sobre el área completa de corte, evitando cualquier traslapo.

Las mezcladoras operadas en forma mecánica tendrán que usarse para la fabricación de la lechada a partir de agentes estabilizadores secos en polvo y agua. La mezcladora deberá estar equipada con una pantalla, con aberturas que no excedan los 5 mm, y tendrá que ser capaz de producir una lechada de consistencia uniforme y contenido de agua constante a la tasa requerida para la estabilización. El sistema empleado para transferir la lechada al proceso de fresado mezclado debe cumplir con los requerimientos de la cláusula A4.4.3.3.

A4.4.3.2 Agentes estabilizadores bituminosos

Los agentes estabilizadores bituminosos deberán adicionarse al proceso de fresado/mezclado mediante bombeo desde carrotaques móviles, los cuales pueden empujarse delante de la máquina recicladora o engancharse en la parte posterior. Se permitirá que estos carrotaques descarguen al lado de la máquina recicladora únicamente cuando la configuración del carril sea tal que la acomodación del tráfico no resulte afectada.

Los carrotaques deberán estar equipados con un termómetro y sistemas de calentamiento para asegurar que el agente estabilizador bituminoso se mantiene 5°C alrededor de la temperatura establecida de aplicación, en las especificaciones del proyecto.

Los agentes estabilizadores bituminosos que se hayan calentado por encima de la máxima temperatura indicada en las especificaciones del proyecto no podrán usarse y deberán removerse del sitio.

El sistema empleado para adicionar los agentes estabilizadores bituminosos al proceso de reciclaje tiene que cumplir con los requerimientos de la cláusula A4.4.3.3.

Deberá tomarse un litro de muestra de agente estabilizador bituminoso de cada carga de carrotaque y retenerse en un recipiente sellado como provisión para ensayos futuros.

Cuando se trabaja con asfalto espumado, sus características se determinan mediante una muestra obtenida de la boquilla de prueba máximo cinco minutos después de comenzar el reciclaje con cada nueva carga de carrotaque.

A4.4.3.3 Adición de agentes estabilizadores fluidos

El sistema de bombeo requerido para inyectar un agente estabilizador fluido en el proceso de mezclado deberá controlarse con el mismo sistema de microprocesador que monitorea la velocidad de viaje de la máquina para verificar la adición de agua.

A4.4.3.4 Control del contenido de humedad del material reciclado

Deberá adicionarse agua suficiente durante el proceso de reciclaje para alcanzar los requerimientos de humedad especificados a continuación, pero únicamente por medio del sistema de control del microprocesador de la máquina recicladora; además, habrá que tener especial cuidado para prevenir excesos de humedad en cualquier parte del trabajo.

Se rechazará cualquier sector del trabajo que esté muy húmedo y el contratista será el responsable de corregir el contenido de humedad mediante el secado y el procesamiento del material, así como de suministrar el agente estabilizador fresco si éste es de tipo cementante, todo esto costado por él.

El tipo de agente estabilizador empleado gobernará el contenido de humedad del material reciclado en el momento de la compactación:

i) Agentes estabilizadores cementantes

El contenido de humedad durante la compactación nunca excederá el 75 % del contenido de humedad de saturación del material natural, sin agente estabilizador, calculado a su máxima densidad seca.

El contenido de humedad al grado de saturación especificado deberá determinarse como sigue:

$$W_v = S_r \times \left(\frac{X_w}{X_d} - \frac{1000}{G_s} \right)$$

Donde W_v = Contenido de humedad del material con el grado de saturación especificado [%]

S_r = Grado de saturación especificado	[%]
X_w = Densidad del agua	[kg/m ³]
X_d = Densidad seca máxima del material natural	[kg/m ³]
G_s = Densidad aparente del material	[kg/m ³]

ii) Agentes estabilizadores no cementantes y materiales reciclados sin agentes estabilizadores

El contenido de humedad durante la compactación no deberá exceder, ni estar más del 2 % por debajo, del contenido de humedad óptimo.

iii) Emulsión asfáltica

El contenido total de fluidos del material durante la compactación no sobrepasará el contenido óptimo de fluidos totales. El contenido de fluidos totales se determinará sumando la cantidad total de emulsión asfáltica aplicada (no sólo la fracción de agua) al contenido de humedad del material antes del mezclado, más cualquier otra agua incorporada, independientemente de la contenida en la emulsión.

A4.4.4 Reciclaje en frío *in situ*

Deberá alistarse y operarse la máquina recicladora para asegurar que se alcancen los siguientes requerimientos:

A4.4.4.1 Gradación del material reciclado

Deberán ajustarse la velocidad de avance de la máquina recicladora, la tasa de rotación del tambor fresador y la posición de la compuerta de control de gradación para que el material *in situ* se fraccione a una gradación aceptable.

El contratista tomará las medidas necesarias para garantizar que la gradación que resulta del proceso de reciclaje concuerde con la establecida durante la sección de demostración, como se describe en la cláusula A4.4.7.

A4.4.4.2 Adición de agua y agentes estabilizadores fluidos

El sistema de control por microprocesador para la adición de agua y agentes estabilizadores fluidos se ajustará y verificará cuidadosamente para asegurar que se cumpla con los requerimientos de la humedad de compactación y del contenido de agente estabilizador.

Los carrotanques de asfalto deberán medirse al final de cada corte para verificar el uso real contra la demanda teórica calculada.

A4.4.4.3 Control del espesor de corte

La profundidad real de corte deberá medirse físicamente a los dos extremos del tambor fresador y a lo largo de la longitud de corte, por lo menos una vez cada 100 m.

amente a los dos extremos del tambor fresador y a lo largo de la longitud de corte, por lo menos una vez cada 100 m.

A4.4.4.4 Traslapos y juntas longitudinales

Las juntas longitudinales, entre cortes sucesivos, deberán traslaparse por lo menos 50 mm con el objeto de asegurar el completo reciclaje a través del ancho de la vía. Tendrán que chequearse las líneas de corte, previamente marcadas en la superficie de la vía, para que sólo el primer corte tiene el mismo ancho del tambor fresador.

Todos los anchos de corte sucesivos deberán ser por lo menos 50 mm más angostos que el ancho del tambor.

Así mismo, habrá que guiar la máquina recicladora para que siga apropiadamente las líneas de corte marcadas con antelación. Cualquier desviación de más de 50 mm deberá rectificarse de inmediato dando reversa hasta donde la desviación comenzó y procesando nuevamente a lo largo de la línea de corte, sin añadir más agua o agente estabilizador.

El ancho del traslapo deberá verificarse antes de empezar cada nueva secuencia de corte y todos los ajustes tendrán que hacerse para asegurar que la cantidad de agua y de agente estabilizador fluido que se va a adicionar se reduce de manera proporcional al ancho del traslapo.

A4.4.4.5 Continuidad de la capa estabilizada

El contratista deberá verificar que no queden zonas de material sin reciclar entre cortes sucesivos a lo largo de la misma línea longitudinal de corte, ni cuñas sin tratar creadas por la entrada del tambor fresador en el material existente.

Además, tendrá que marcarse cuidadosamente la localización exacta a la cual terminó cada corte. Esta marca deberá coincidir con la posición del centro del tambor mezclador, en el punto en que cesó el suministro del agente estabilizador.

El siguiente corte sucesivo deberá empezar por lo menos 0,5 m (500 mm) detrás de esta marca para asegurar la continuidad de la capa estabilizada.

A4.4.5 Inestabilidad de la subrasante

Si se identifica la inestabilidad en la subrasante, ya sea a partir de las investigaciones preliminares o durante el proceso de reciclaje, ésta debe tratarse mediante:

- La recuperación del material de las capas del pavimento sobre el material inestable, ya sea fresando o excavando y cargando en camiones para transportar a un depósito temporal;

- La excavación del material inestable a la profundidad prescrita y su remoción como desperdicio;
- El tratamiento de la subrasante expuesta, como se especifica; y
- El relleno de la excavación con material almacenado e importado.

Después de la compactación, el relleno deberá colocarse en capas cuyo espesor no supere los 200 mm, colocadas sucesivamente hasta alcanzar el nivel de la vía en donde continuará el reciclaje.

Cuando se considere necesario, las especificaciones del proyecto detallarán los requerimientos para la profundidad de excavación, el tratamiento a la subrasante expuesta y la calidad de material que se importará como relleno. También deberá informarse sobre las áreas de posible inestabilidad en la subrasante.

A4.4.6 Compactación y terminado

A4.4.6.1 Control de nivel y forma

El material procesado deberá esparcirse para llenar el vacío de corte. Esto puede realizarse con una plancha ensamblada en la parte posterior de la máquina recicladora o con una motoniveladora. Mientras se distribuye el material, hay que tener cuidado para prevenir la segregación, especialmente cuando el espesor de la capa es superior a 200 mm y el material reciclado incluye asfalto.

Antes que el material reciba todo el esfuerzo de compactación deben identificarse los requerimientos de nivel y de sección transversal, previniendo que la superficie final se rompa y se descascare. Los niveles de superficie y forma pueden alcanzarse:

- Configurando la plancha montada en la parte de atrás de la máquina; o
- Cortando con una motoniveladora.

A4.4.6.2 Compactación

Después de la colocación y de la conformación, el material reciclado debe compactarse con el equipo apropiado hasta obtener la compactación especificada. Hay que comenzar este proceso tan pronto como sea práctico y deberá seguir un orden predeterminado, como se describe en la cláusula A4.4.7.

En las especificaciones del proyecto se deberán detallar los requerimientos de densidad. Su control se aplicará a:

- La densidad promedio alcanzada en todo el espesor de la capa; y

- La densidad del tercio inferior de la capa, que no deberá ser menor que la densidad promedio menos el 2 %.

A4.4.6.3 Rociado, terminado y curado

Luego de la compactación, la superficie de la vía deberá tratarse con una ligera aplicación de agua, o de emulsión asfáltica diluida cuando así se indique en las especificaciones del proyecto, y compactarse con máquinas de llanta neumática para crear una textura cerrada.

Hay que mantener la superficie de la capa reciclada continuamente humedecida mediante riegos ligeros de agua aplicados con frecuencia. No deberá aplicarse a la superficie una imprimación bituminosa, un riego o un sello hasta que el contenido de humedad de la capa esté por lo menos 2 % por debajo del contenido de humedad de saturación.

La capa final terminada deberá estar libre de:

- Laminaciones superficiales;
- Sectores que exhiban segregación de finos y agregados gruesos; y
- Corrugaciones, o cualquier otro defecto que pueda afectar adversamente el desempeño de la capa.

A4.4.6.4 Apertura al tráfico

A menos que se indique de otra manera en las especificaciones del proyecto, el ancho total de la vía deberá abrirse al tráfico fuera de las horas diurnas normales de trabajo. Como se detalla en las secciones relevantes de las especificaciones del proyecto, todas las señales temporales, delineadores y otros elementos para el control del tráfico deberán estar en su lugar antes que la vía se abra al tráfico.

A4.4.7 Secciones de demostración

Al iniciar el proyecto, el contratista deberá ensamblar todos los elementos de la planta y del equipo que se proponga utilizar para el reciclaje en frío en el sitio y procesará la primera sección de vía que va a rehabilitar para:

- Demostrar que el equipo y los procesos propuestos son capaces de construir la capa reciclada de acuerdo con los requerimientos especificados;
- Establecer el efecto de la variación en la velocidad de avance de la máquina recicladora y en la tasa de rotación del tambor fresador sobre la gradación del material reciclado; y

- Determinar la secuencia y forma de compactación para obtener los requerimientos mínimos.

Una sección de demostración deberá tener al menos 100 m de longitud y todo el ancho del carril o de la mitad de la vía.

Si el contratista debe hacer alguna alteración en los métodos, procesos, equipos o materiales utilizados o si no cumple consistentemente con las especificaciones debido a cambios del material in situ o por alguna otra razón, se le puede exigir que lleve a cabo más demostraciones, antes de continuar con el trabajo permanente.

A4.5 Protección y mantenimiento

El contratista protegerá y mantendrá la capa reciclada terminada hasta que se aplique la siguiente o un tratamiento superficial. Además de los riegos frecuentes de agua para prevenir que la superficie se seque, el mantenimiento deberá incluir la reparación inmediata de cualquier daño o defecto en la capa y repetirlos tan seguido como sea necesario. Las reparaciones deberán hacerse de tal modo que se garantice la restauración de la superficie de una manera pareja y uniforme. El contratista asumirá el costo de dichas reparaciones, excepto cuando el daño sea resultado del desgaste debido al tráfico temprano. El daño ocasionado por el tráfico prolongado debido a la demora en la siguiente capa o del tratamiento superficial no se considerará justo si dicho retraso se produjo por circunstancias bajo el control del contratista.

A4.6 Tolerancias de construcción

Tanto los niveles de la superficie como los espesores de capa estarán sujetos a análisis estadísticos únicamente cuando las especificaciones del proyecto exijan el fresado para lograr la forma prescrita antes del reciclaje.

La capa reciclada terminada tendrá que cumplir con las tolerancias de construcción dadas a continuación:

A4.6.1 Niveles de superficie

El tamaño de un lote deberá ser por lo menos de 50 niveles tomados en un patrón aleatorio. El lote cumplirá con los requerimientos especificados si tiene las siguientes tolerancias:

- $H_{90} \leq \sim 20$ mm (el 90 % de los niveles medidos de la superficie estará, como mínimo, 20 mm más o menos de los niveles especificados); y
- $H_{m\acute{a}x} \leq 25$ mm (las manchas individuales no deben desviarse en más de 25 mm de los niveles especificados).

A4.6.2 Espesores de capa

El tamaño del lote deberá ser por lo menos de 20 medidas de espesores de capa. El lote cumplirá con los requerimientos especificados si obtienen las siguientes tolerancias:

- $D_{90} \geq 20$ mm (el 90 % de todos los espesores medidos como mínimo son iguales o superiores al espesor especificado menos 20 mm);
- $D_{prom.} \geq D_{esp.} - \frac{D_{esp.}}{20}$

(el promedio del espesor de la capa del lote no debe ser menor que el espesor especificado menos el espesor de la capa especificado dividido por 20); y

- $D_{m\acute{a}x} < 30$ mm (Los espesores de la capa, medidos individualmente, no deben ser menores que el espesor especificado menos 30 mm).

A4.6.3 Ancho

El ancho de la capa reciclada en ninguna parte deberá ser menor que el ancho establecido en las especificaciones del proyecto.

A4.6.4 Sección transversal

Cuando se ensaye con una regla de 3 m colocada formando ángulos rectos con el eje central de la vía, la superficie no debe desviarse en más de 10 mm medidos desde la base de la regla.

En cualquier sección transversal, la diferencia de nivel entre dos puntos no debe variar en más de 15 mm de su diferencia calculada a partir de la sección transversal requerida.

A4.6.5 Regularidad superficial

Cuando se ensaye la capa reciclada terminada con una regla de compactación, el número de irregularidades de la superficie no debe exceder de:

- Seis, para el número promedio de irregularidades por 100 m iguales o superiores a 6 mm cuando se toman sobre 300 a 600 m de longitud; y
- Ocho, para el número de irregularidades iguales o superiores a 6 mm cuando se toman sobre una sección sencilla de 100 m.

Cualquier irregularidad individual medida con la regla de compactación o con la regla de 3 m, puesta de manera paralela al eje de la vía, no debe exceder de 10 mm.

Sin embargo, este requerimiento puede pasarse por alto cuando pueda identificarse que las irregu-

laridades las causan factores fuera de control por parte del contratista.

A4.7 Inspección y ensayos de rutina

Al final del trabajo diario, antes de abrir la vía al tráfico, el ingeniero realizará inspecciones y conducirá ensayos de rutina con el objeto de determinar si la calidad del material y del grupo de trabajo cumple con los requerimientos de las especificaciones. Los resultados de los ensayos y de las medidas se valorarán de acuerdo con lo estipulado en las especificaciones del proyecto. Las características que pueden estar sujetas a un esquema de evaluaciones y la selección de estas propiedades deben determinarse a partir del o de los agentes estabilizadores empleados:

- i) Estabilización química
 - Densidad relativa (compactación);
 - Contenido de cementante - ligante;
 - Resistencia a la tensión indirecta (ITS); o
 - Resistencia a la compresión inconfiada (UCS).
- ii) Estabilización con ligantes bituminosos
 - Densidad relativa (compactación);
 - Contenido de ligante; y/o
 - Resistencia a la tensión indirecta (ITS).

El tamaño mínimo del lote y los criterios de aceptación de cada propiedad que vaya a evaluarse deben describirse en las especificaciones del proyecto.

A4.8 Medidas y pago

En la descripción de ciertos ítems de pago se especifica que las cantidades se determinarán por "dimensiones autorizadas". Esto se asumirá como las dimensiones especificadas o mostradas en cualquier esquema o instrucción escrita dada al contratista, sin el consentimiento de tolerancias. Si el trabajo se construye de acuerdo con las dimensiones autorizadas, más o menos cualquier tolerancia permitida, las cantidades se calcularán de acuerdo con las dimensiones autorizadas, independientemente de las dimensiones reales.

Ítem	Unidad
<i>A4.01 Preparación de la superficie de la vía para el reciclaje en frío in situ</i>	metro cuadrado (m ²)

La unidad de medida deberá ser el m² de superficie de vía que se rehabilitará mediante el reciclaje

en frío, calculada de la dimensión de ancho autorizada multiplicada por la longitud real medida a lo largo de la línea central de la vía.

En la tasa ofrecida se incluirá la compensación de todo el trabajo necesario para limpiar la vía del agua, vegetación, basura y otros materiales extraños, y la remoción, transporte y disposición de cualquier desecho resultante según lo especificado.

Ítem	Unidad
<i>A4.02 Reciclaje en frío in situ de todos los materiales para la construcción de nuevas capas de pavimento:</i>	

- a)mm (específico) espesor de capa terminada:
 - i) Ancho de vía de 5 m o menos metro cúbico (m³)
 - ii) Ancho de vía mayor que 5 m y menor que 6 m. metro cúbico (m³)
 - iii) Etc. para incrementos de ancho de carril de 1 m.
- b) Etc. para cada espesor de capa especificado.

La unidad de medida deberá ser el metro cúbico de capa construida y terminada de pavimento mediante el reciclaje en frío del material in situ, independientemente de la dureza de éste, e incluyendo o no material importado. La cantidad tendrá que calcularse a partir de las dimensiones autorizadas por el ancho y el espesor de la capa terminada, multiplicada por la longitud real medida a lo largo de la línea central de la vía. El ancho autorizado no se aumentará para incluir cualquier holgura para el traslape mínimo especificado entre cortes adyacentes, ni para el número de cortes requeridos para cubrir el ancho total de vía.

En las tasas ofrecidas se incluirá la compensación por la preparación de los trabajos para el reciclaje de todos los tipos de materiales en la estructura existente del pavimento, a la profundidad especificada, junto con cualquier agente estabilizador o material importado que pueda incorporarse, por el suministro y adición de agua, por el mezclado, colocado y compactado del material, por el procesamiento del material en los traslapes adyacentes a los cortes, independientemente del número de cortes o ancho de traslape necesario para cubrir el ancho total de vía, por el curado, protección y mantenimiento de la capa y por las inspecciones de control, medidas y ensayos.

Ítem	Unidad	
<p>A4.03 <i>Extra sobre el ítem A4.02 para capas de material asfáltico dentro de la porción reciclada de pavimento existente donde el espesor promedio de las capas asfálticas es:</i></p> <p>a) Mayor de 50 mm pero menor o igual a 75 mm. metro cúbico (m³)</p> <p>b) Mayor de 75 mm pero menor o igual a 100 mm. metro cúbico (m³)</p> <p>c) Etc. para incrementos de 25 mm.</p> <p>La unidad de medida deberá ser la misma que para el ítem A4.02, la media extra aplicada a todo el espesor de capa, independientemente de las proporciones relativas de asfalto y de otro material que constituye el material en la profundidad total de la capa fresada. No se hará ningún pago adicional donde el espesor de la capa asfáltica sea menor o igual a 50 mm.</p> <p>En las tasas ofrecidas se incluirá la compensación total de los costos adicionales directos o indirectos en que se incurrió como resultado del reciclaje de material, que comprende capas asfálticas con espesores mayores de 50 mm. Estos costos incluirán, pero no estarán limitados por el desgaste extra en la planta y equipo, herramientas de obra y valores adicionales en que se incurre cuando la tasa de avance dicta que el pavimento es fresado antes de estabilizado y todas las tolerancias por retrasos causados por la tasa de producción lenta resultante.</p>	<p>c) Etc. para cada material importado diferente.</p> <p>La unidad de medida para los productos de piedra triturada comprada de fuentes comerciales deberá ser la tonelada de material puesto en el sitio e incorporado al material reciclado. La medida se basará en tiquetes de báscula. La unidad de medida para el material natural comprado de fuentes comerciales u obtenido de préstamo será el metro cúbico, medido como el 70 % del volumen lleno del vehículo de transporte.</p> <p>En la tasa ofrecida se deberá incluir la compensación total por la procura, equipamiento y extendido en la vía del material importado, como una capa de corrección de nivel o como una capa de espesor uniforme, o por ladearlo en la tolva de recepción de una unidad de reciclaje donde se fresa por separado del reciclaje, por el transporte de material desde el punto de suministro a su posición final en la vía, por los riegos de agua y compactación ligera, donde se necesite, y por cualquier desperdicio.</p>	
<p>A4.04 <i>Material importado para adición al proceso de reciclaje en frío in situ:</i></p> <p>a) Productos de piedra triturada de fuentes comerciales:</p> <p>i) Tamaño y descripción de producto triturado. toneladas (t)</p> <p>ii) Etc. para cada tipo y tamaño de producto.</p> <p>b) Gravas y arenas naturales de fuentes comerciales:</p> <p>i) Tamaño y descripción del producto natural. metro cúbico (m³)</p> <p>ii) Etc. para cada tipo de material natural.</p>	<p>Unidad</p>	<p>Ítem</p> <p>A4.05 <i>Agentes estabilizadores químicos:</i></p> <p>a) Cemento Portland ordinario toneladas (t)</p> <p>b) Etc. para cada tipo de agente estabilizador especificado.</p> <p>La unidad de medida deberá ser la tonelada de agente estabilizador realmente consumido en el proceso de reciclaje en frío in situ. La medida se basará en tiquetes de báscula cuando el proveedor sea granel, o en conteos acordados cuando el suministro sea en bultos o en bolsas.</p> <p>La tasa ofrecida deberá incluir la compensación total por la procura y el suministro de agente estabilizador, por su adición al proceso en frío de reciclaje in situ, incluyendo el transporte, manejo, almacenamiento bajo techo donde se requiera, remanejo y extendido o fluidificación en una lechada y bombeo al proceso, por la pérdida y medidas de seguridad durante el manejo y por la disposición de todos los empaques.</p>

Ítem	Unidad
<i>A4.06 Agentes estabilizadores bituminosos:</i>	
a) Emulsión asfáltica:	
i) 60 % de asfalto residual, catiónica	tonelada (t)
ii) Etc. para cada tipo de emulsión asfáltica.	
b) Asfalto espumado producido a partir de:	
i) Asfalto de penetración 80/100	tonelada (t)
ii) Etc. para cada tipo diferente de asfalto.	
c) Etc. para cada otro tipo de agente estabilizador bituminoso.	

La unidad de medida será la tonelada de agente estabilizador bituminoso realmente consumido en el proceso de reciclaje en frío in situ. La medida se basará en la penetración con varilla de los carro-tanques, ejecutada antes y después de que se aplique el agente estabilizador y soportada por ti-quetes de báscula expedidos para cada carga de carrotanque en el punto de suministro.

En la tasa ofrecida se deberá incluir la compensación total por la procura y suministro de agentes estabilizadores bituminosos, por su adición en el proceso de reciclaje en frío in situ, por cualquier químico u otro aditivo introducido, por el agua para alcanzar el espumado cuando se requiera, por todo el transporte, calentamiento, manejo almacénamiento y aplicación por bombeo en el proceso, por todo el desperdicio y por la toma de las medidas de seguridad necesarias en el manejo.

Ejemplo de un cuadro típico de cantidades

Vía de longitud 30 km y ancho 7,3 m, reciclada hasta una profundidad de 175 mm, incorporando 3 % de emulsión asfáltica, 1½ % de cemento y una capa de 25 mm de polvo de trituración, esparcido sobre la superficie antes del reciclaje. Asuma que el pavimento existente consiste en 80 mm de carpeta asfáltica sobre una base granular, con algunos parcheos profundos (110 mm). (En caso de inestabilidad. se realiza una provisión para el reciclaje profundo: 250 mm.)

Ítem No.	Descripción	Unidad	Cantidad	Tasa	Valor
	Sección A 4000: Reciclaje en frío in situ				
A4.01	Preparación de la superficie existente para el reciclaje en frío in situ	m ²	220 000		
A4.02	Reciclaje en frío in situ de todos los materiales para la construcción de una capa nueva del pavimento: a) Espesor de 180 mm de capa terminada: i) Ancho de la vía mayor que 7,0 m pero menor que 7,5 m b) Espesor de la capa terminada de 250 mm: i) Ancho de la vía mayor que 7,0 m pero menor que 7,5 m (prov.)	m ³	40 000		
		m ³	1 000		
A4.03	Extra sobre el ítem A4.02 para capas asfálticas dentro de la porción reciclada del pavimento existente, donde el espesor promedio de las capas es: a) Mayor que 75 mm, pero menor o igual que 100 mm b) Mayor que 100 mm, pero menor o igual que 125 mm (prov.)	m ³	40 000		
		m ³	1 000		
A4.04	Material importado para incorporarse en el proceso de reciclaje en frío in situ: a) Piedra triturada obtenida de fuentes comerciales i) Polvo de trituración menor que 6,7 mm	t	10 000		
A4.05	Agentes estabilizadores químicos: a) Cemento Portland de alto horno	t	1 500		
A4.06	Agentes estabilizadores bituminosos a) Emulsión asfáltica i) 60 % de asfalto residual, catiónica	t	3 000		
Total de la sección A 4000 para llevarlo al resumen					

Apéndice 5

Análisis de costos

A5.1	Tarifas básicas	153
A5.2	Ejemplo de un reciclaje profundo	154
A5.3	Ejemplo de un reciclaje superficial o de capas delgadas	158
A5.4	Ejemplo de mejoramiento de una vía en grava no pavimentada	160

A5.1 Tarifas básicas

Se analizan las diferentes opciones de reciclaje consideradas en el Apéndice 1, con el objeto de comparar los costos de cada alternativa.

A continuación se indican las tarifas unitarias de los diferentes ítems incluidos en cada una de las opciones de reciclaje. Éstas se basan en las tarifas contractuales aplicables en la industria de la construcción de carreteras en Suráfrica, a agosto de 2001, y se han convertido a dólares usando US\$ 1 = R 8,50.

<i>ÍTEM</i>	<i>Tarifa (US\$)</i>	<i>Unidad</i>
Máquina recicladora y equipo complementario*	2	m ²
Fresado y disposición del material fresado	15	t
Mezcla asfáltica en caliente (suministro y colocación)	50	t
Asfalto: grado de penetración	200	t
Emulsión asfáltica	200	t
Suministro de piedra triturada	20	t
Suministro de polvo de trituración	10	t
Cemento	70	t
Suministro de grava	12	t
Procesamiento de nuevas capas	1,5	m ²
Parcheo de áreas pequeñas	20	m ²
Sello superficial con grava fina	2	m ²

* Aunque en estos ejemplos se ha asumido la tarifa de US\$ 2/m², debe hacerse hincapié en que ésta depende de muchas variables (tamaño de la máquina, alcance del proyecto, restricciones de tiempo, etc.). Dependiendo del proyecto específico, esta tarifa puede variar US\$ 1/m² a más de US\$ 10/m².

A5.2 Ejemplo de un reciclaje profundo

En este ejemplo (ver la figura A1.6 del Apéndice 1) el pavimento fallado consiste en tres capas asfálticas agrietadas de 170 mm de espesor, que descansan sobre 250 mm de piedra triturada. Las opciones de rehabilitación consideradas son:

Opción 1 Reconstrucción del pavimento

En esta opción los 170 mm de las capas asfálticas agrietadas se fresarán y descartarán, y luego se pondrá y procesará una capa de 150 mm de piedra triturada. Una base asfáltica de 80 mm y una rodadura de 50 mm, nuevas se colocarán sobre la capa de piedra triturada.

1) Remoción de las capas asfálticas		
1 Espesor de las capas asfálticas	170,00	mm
2 Densidad de las capas asfálticas	2,40	t/m ³
3 Fresado y disposición del material fresado	15,00	US\$/t
4 Costo de la remoción de las capas asfálticas ($\frac{\text{Ítem 1}}{1000} \times \text{Ítem 2}$) x Ítem 3	6,12	US\$/m ²

2) Suministro de piedra triturada		
1 Espesor de la capa de piedra triturada	150,00	mm
2 Densidad de la capa de piedra triturada	2,30	t/m ³
3 Suministro de la piedra triturada	20,00	US\$/t
4 Costo de la capa de piedra triturada ($\frac{\text{Ítem 1}}{1000} \times \text{Ítem 2}$) x Ítem 3	6,90	US\$/m ²

3) Procesamiento de la piedra triturada		
1 Procesamiento de la capa	1,50	US\$/m ²

4) Capas asfálticas		
1 Espesor de las capas asfálticas	130,00	mm
2 Densidad de las capas asfálticas	2,40	t/m ³
3 Suministro y colocación	50,00	US\$/t
4 Costo de las capas asfálticas ($\frac{\text{Ítem 1}}{1000} \times \text{Ítem 2}$) x Ítem 3	15,60	US\$/m ²

Resumen de costos		
Remoción de 170 mm de capas asfálticas	6,12	US\$/m ²
Capa de piedra triturada importada de 150 mm de espesor	6,90	US\$/m ²
Procesamiento de la capa	1,50	US\$/m ²
Capas asfálticas de 130 mm de espesor	15,60	US\$/m ²
Costo total	30,12	US\$/m ²

Opción 2 Carpetas asfálticas

En esta opción se asume que solamente hay que remover el 12 % de las capas asfálticas agrietadas hasta una profundidad de 90 mm y luego parchar con una capa asfáltica nueva. Después de esta operación se colocarán sobre la superficie parchada una base asfáltica de 100 mm y una rodadura de 50 mm.

1) Parcheo de la superficie existente		
1 Área por parchear	12,00	%
2 Parcheo de áreas pequeñas	20,00	US\$/m ²
3 Costo del parcheo ($\frac{\text{Ítem 1}}{100} \times \text{Ítem 2}$)	2,40	US\$/m ²

2) Capas asfálticas		
1 Espesor de las capas asfálticas	150,00	mm
2 Densidad de las capas asfálticas	2,40	t/m ³
3 Suministro y colocación de las capas asfálticas	50,00	US\$/t
4 Costo de las capas asfálticas ($\frac{\text{Ítem 1}}{1000} \times \text{Ítem 2}$) x Ítem 3	18,00	US\$/m ²

Resumen de costos		
Parcheo del 12 % de la superficie	2,40	US\$/m ²
Capas asfálticas de 150 mm de espesor	18,00	US\$/m ²
Costo total	20,40	US\$/m ²

Opción 3a Reciclaje de 300 mm con cemento, in situ

La opción de reciclaje en frío con cemento requerirá el fresado de los 170 mm de carpetas asfálticas agrietadas, junto con 130 mm de la capa de piedra triturada y la incorporación de 3 %, en masa, de cemento dentro de la capa homogénea de 300 mm. Posteriormente, se pondrán una capa de base asfáltica de 80 mm de espesor y una rodadura de 50 mm sobre el material reciclado.

1) Recicladora		
1 Máquina recicladora y equipo complementario	2,00	US\$/m ²

2) Incorporación de cemento		
1 Espesor de la capa reciclada	300,00	mm
2 Densidad del material reciclado	2,00	t/m ³
3 Cemento por incorporar	3,00	%
4 Capas asfálticas de 130 mm de espesor	70,00	US\$/t
5 Costo del cemento ($\frac{\text{Ítem 1}}{1000} \times \text{Ítem 2}$) x ($\frac{\text{Ítem 3}}{100} \times \text{Ítem 4}$)	1,26	US\$/m ²

3) Capas asfálticas		
1 Espesor de las capas asfálticas	130,00	mm
2 Densidad de las capas asfálticas	2,40	t/m ³
3 Suministro y colocación	50,00	US\$/t
4 Costo de las capas asfálticas ($\frac{\text{ítem 1}}{1000} \times \text{Ítem 2}$) x Ítem 3	15,60	US\$/m ²

Resumen de costos		
Recicladora	2,00	US\$/m ²
Cemento 3 %	1,26	US\$/m ²
Capas asfálticas de 130 mm	15,60	US\$/m ²
Costo total	18,86	US\$/m ²

Opción 3b(i) Reciclaje con emulsión asfáltica y cemento Portland, in situ

El reciclaje in situ con emulsión asfáltica y cemento, requiere el fresado de los 170 mm de capas asfálticas agrietadas, junto con 50 mm de la capa de piedra triturada, dentro de una capa homogénea de 225 mm, e incorporar 4 % de emulsión asfáltica y 1,5 % de cemento. Sobre la capa reciclada se colocarán 50 mm de rodadura asfáltica.

1) Recicladora		
1 Máquina recicladora y equipo complementario	2,00	US\$/m ²

2) Incorporación de cemento		
1 Espesor de la capa reciclada	225,00	mm
2 Densidad del material reciclado	2,00	t/m ³
3 Cemento por incorporar	1,50	%
4 Cemento	70,00	US\$/t
5 Costo del cemento ($\frac{\text{ítem 1}}{1000} \times \text{Ítem 2}$) x ($\frac{\text{ítem 3}}{100} \times \text{Ítem 4}$)	0,47	US\$/m ²

3) Incorporación de la emulsión asfáltica		
1 Espesor de la capa reciclada	225,00	mm
2 Densidad del material reciclado	2,00	t/m ³
3 Emulsión asfáltica por incorporar	4,00	%
4 Tarifa de la emulsión asfáltica	200,00	US\$/t
5 Costo de la emulsión ($\frac{\text{ítem 1}}{1000} \times \text{Ítem 2}$) x ($\frac{\text{ítem 3}}{100} \times \text{Ítem 4}$)	3,60	US\$/m ²

4) Capas asfálticas		
1 Espesor de las capas asfálticas	50,00	mm
2 Densidad de las capas asfálticas	2,40	t/m ³
3 Suministro y colocación	50,00	US\$/t
4 Costo de las capas asfálticas ($\frac{\text{Ítem 1}}{1000} \times \text{Ítem 2}$) x Ítem 3	6,00	US\$/m ²

Resumen de costos		
Recicladora	2,00	US\$/m ²
Cemento 1,5 %	0,47	US\$/m ²
Emulsión asfáltica 4 %	3,60	US\$/m ²
Capas asfálticas de 50 mm	6,00	US\$/m ²
Costo total	12,07	US\$/m ²

Opción 3b(ii) Reciclaje con cemento asfáltico espumado y cemento Portland, in situ

Esta opción es similar a la descrita en 3b(i). En este caso, el 4 % de emulsión asfáltica se reemplaza por 2,5 % de cemento asfáltico espumado, mientras que el contenido de cemento Portland y el espesor de la capa asfáltica de rodadura permanecen iguales.

1) Recicladora		
1 Máquina recicladora y equipo complementario	2,00	US\$/m ²

2) Incorporación de cemento		
1 Espesor de la capa reciclada	225,00	mm
2 Densidad del material reciclado	2,00	t/m ³
3 Cemento por incorporar	1,50	%
4 Cemento	70,00	US\$/t
5 Costo del cemento ($\frac{\text{Ítem 1}}{1000} \times \text{Ítem 2}$) x ($\frac{\text{Ítem 3}}{100} \times \text{Ítem 4}$)	0,47	US\$/m ²

3) Incorporación de cemento asfáltico espumado		
1 Espesor de la capa reciclada	225,00	mm
2 Densidad del material reciclado	2,00	t/m ³
3 Cemento asfáltico espumado por incorporar	2,50	%
4 Tarifa del cemento asfáltico espumado	200,00	US\$/t
5 Costo del cemento asfáltico espumado ($\frac{\text{Ítem 1}}{1000} \times \text{Ítem 2}$) x ($\frac{\text{Ítem 3}}{100} \times \text{Ítem 4}$)	2,25	US\$/m ²

4) Capas asfálticas		
1 Espesor de las capas asfálticas	50,00	mm
2 Densidad de las capas asfálticas	2,40	t/m ³
3 Suministro y colocación	50,00	US\$/t
4 Costo de las capas asfálticas ($\frac{\text{Ítem 1}}{1000} \times \text{Ítem 2}$) x Ítem 3	6,00	US\$/m ²

Resumen de costos		
Recicladora	2,00	US\$/m ²
Cemento 1,5 %	0,47	US\$/m ²
Cemento asfáltico espumado 2,5 %	2,25	US\$/m ²
Capas asfálticas de 50 mm	6,00	US\$/m ²
Costo total	10,72	US\$/m ²

A5.3 Ejemplo de un reciclaje superficial o de capas delgadas

En este ejemplo (ver la Figura A1.7 del Apéndice 1) el pavimento fallado tiene 300 mm de capas asfálticas, de los cuales los primeros 150 mm están agrietados y consisten en tres capas de 50 mm cada una. Las opciones para la rehabilitación son:

Opción 1 Capas asfálticas

En esta opción se asume que el 12 % del área de las dos capas superiores de 50 mm se encuentra severamente fallado y requiere parcheo. Después se pondrá una capa asfáltica de 80 mm de espesor.

1) Parcheo de la superficie existente		
1 Área por parchear	12,00	%
2 Parcheo de áreas pequeñas	20,00	US\$/m ²
3 Costo del parcheo ($\frac{\text{Ítem 1}}{100} \times \text{Ítem 2}$)	2,40	US\$/m ²

2) Capas asfálticas		
1 Espesor de las capas asfálticas	80,00	mm
2 Densidad de las capas asfálticas	2,40	t/m ³
3 Suministro y colocación de las capas asfálticas	50,00	US\$/t
4 Costo de las capas asfálticas ($\frac{\text{Ítem 1}}{1000} \times \text{Ítem 2}$) x Ítem 3	9,60	US\$/m ²

Resumen de costos		
Parcheo del 12 % de la superficie	2,40	US\$/m ²
Capas asfálticas de 80 mm de espesor	9,60	US\$/m ²
Costo total	12,00	US\$/m²

Opción 2 Fresado y remplazo

En esta opción las dos capas superiores agrietadas de 50 mm se fresarán y descartarán. Para remplazar las capas asfálticas agrietadas se colocará una nueva capa asfáltica de 100 mm de espesor.

1) Remoción de las capas asfálticas		
1 Espesor de las capas asfálticas	100,00	mm
2 Densidad de las capas asfálticas	2,40	t/m ³
3 Fresado y disposición del material fresado	15,00	US\$/t
4 Costo de la remoción de las capas asfálticas ($\frac{\text{Ítem 1}}{1000} \times \text{Ítem 2}$) x Ítem 3	3,60	US\$/m ²

2) Capas asfálticas		
1 Espesor de las capas asfálticas	100,00	mm
2 Densidad de las capas asfálticas	2,40	t/m ³
3 Suministro y colocación de las capas asfálticas	50,00	US\$/t
4 Costo de las capas asfálticas ($\frac{\text{Ítem 1}}{1000} \times \text{Ítem 2}$) x Ítem 3	12,00	US\$/m ²

Resumen de costos		
Remoción de las capas asfálticas	3,60	US\$/m ²
Capa asfáltica nueva de 100 mm de espesor	12,00	US\$/m ²
Costo total	15,60	US\$/m²

Opción 3 Reciclaje en frío con emulsión asfáltica

En esta opción se reciclarán las dos capas superiores de 50 mm de espesor mediante fresado y mezclado con un 3 % de emulsión asfáltica. La capa reciclada se cubrirá posteriormente con una rodadura asfáltica de 40 mm de espesor.

1) Recicladora		
1 Máquina recicladora y equipo complementario	2,00	US\$/m ²

2) Incorporación de la emulsión asfáltica		
1 Espesor de la capa reciclada	100,00	mm
2 Densidad del material reciclado	2,00	t/m ³
3 Emulsión asfáltica por incorporar	3,00	%
4 Tarifa de la emulsión asfáltica	200,00	US\$/t
5 Costo de la emulsión ($\frac{\text{Ítem 1}}{1000} \times \text{Ítem 2}$) \times ($\frac{\text{Ítem 3}}{100} \times \text{Ítem 4}$)	1,20	US\$/m ²

3) Capas asfálticas		
1 Espesor de las capas asfálticas	40,00	mm
2 Densidad de las capas asfálticas	2,40	t/m ³
3 Suministro y colocación	50,00	US\$/t
4 Costo de las capas asfálticas ($\frac{\text{Ítem 1}}{1000} \times \text{Ítem 2}$) \times Ítem 3	4,80	US\$/m ²

Resumen de costos		
Recicladora	2,00	US\$/m ²
Emulsión asfáltica 3%	1,20	US\$/m ²
Capas asfálticas de 40 mm	4,80	US\$/m ²
Costo total	8,00	US\$/m ²

A5.4 Ejemplo de un mejoramiento de una vía en grava no pavimentada

En este ejemplo (ver Figura A1.9 del Apéndice 1), una vía no pavimentada con 150 mm de una grava como capa portante se mejorará al estado de vía pavimentada. En cada opción la rodadura consistirá en un sello delgado con grava fina.

Opción 1 Capa de piedra triturada

En esta opción se asume que se construirá, sobre la superficie de la vía, una capa de piedra triturada de 125 mm de espesor y posteriormente se aplicará un sello como rodadura.

1) Piedra triturada importada		
1 Espesor de la capa de piedra triturada	125,00	mm
2 Densidad de la capa de piedra triturada	2,30	t/m ³
3 Suministro	20,00	US\$/t
4 Costo de la capa de piedra triturada ($\frac{\text{Ítem 1}}{1000} \times \text{Ítem 2}$) \times Ítem 3	5,75	US\$/m ²

2) Procesamiento de la piedra triturada		
1 Capa procesada	1,50	US\$/m ²

3) Aplicación del sello		
1 Sello superficial con grava fina	2,00	US\$/m ²

Resumen de costos		
Capa de piedra triturada de 125 mm de espesor	5,75	US\$/m ²
Procesamiento de la capa	1,50	US\$/m ²
Sello	2,00	US\$/m ²
Costo total	9,25	US\$/m ²

Opción 2 Capa de grava natural tratada con cemento Portland

En esta opción se usará una capa de 125 mm de espesor de grava natural, estabilizada con 3 % de cemento, en lugar de colocar la capa de piedra triturada usada en la anterior opción. La capa superficial será la misma.

1) Grava importada		
1 Espesor de la capa de grava	125,00	mm
2 Densidad de la capa de grava	1,90	t/m ³
3 Suministro	12,00	US\$/t
4 Costo de la grava ($\frac{\text{Ítem 1}}{1000} \times \text{Ítem 2}$) x Ítem 3	2,85	US\$/m ²

2) Procesamiento de la grava		
1 Capa procesada	1,50	US\$/m ²

3) Incorporación de cemento		
1 Espesor de la capa reciclada	125,00	mm
2 Densidad del material reciclado	1,90	t/m ³
3 Cemento por incorporar	3,00	%
4 Cemento	70,00	US\$/t
5 Costo del cemento ($\frac{\text{Ítem 1}}{1000} \times \text{Ítem 2}$) x ($\frac{\text{Ítem 3}}{100} \times \text{Ítem 4}$)	0,50	US\$/m ²

4) Aplicación del sello		
1 Sello superficial con grava fina	2,00	US\$/m ²

Resumen de costos		
Capa de grava de 125 mm de espesor	2.85	US\$/m ²
Procesamiento de la capa	1.50	US\$/m ²
Cemento 3 %	0.50	US\$/m ²
Sello	2.00	US\$/m ²
Costo total	6.85	US\$/m ²

Opción 3(i) Reciclaje en frío de 100 mm, con emulsión asfáltica y cemento Portland

Esta opción cubre el reciclaje en frío in situ de la grava existente hasta una profundidad de 100 mm, incorporando 5 % de emulsión asfáltica y 1,5 % de cemento. Luego se le aplicará un sello a la superficie.

1) Recicladora		
1 Máquina recicladora y equipo complementario	2,00	US\$/m ²

2) Incorporación de cemento		
1 Espesor de la capa reciclada	100,00	mm
2 Densidad del material reciclado	1,90	t/m ³
3 Cemento por incorporar	1,50	%
4 Tarifa del cemento	70,00	US\$/t
5 Costo del cemento ($\frac{\text{Ítem 1}}{1000} \times \text{Ítem 2}$) \times ($\frac{\text{Ítem 3}}{100} \times \text{Ítem 4}$)	0,20	US\$/m ²

3) Incorporación de la emulsión asfáltica		
1 Espesor de la capa reciclada	100,00	mm
2 Densidad del material reciclado	1,90	t/m ³
3 Emulsión asfáltica por incorporar	5,00	%
4 Tarifa de la emulsión asfáltica	200,00	US\$/t
5 Costo de la emulsión ($\frac{\text{Ítem 1}}{1000} \times \text{Ítem 2}$) \times ($\frac{\text{Ítem 3}}{100} \times \text{Ítem 4}$)	1,90	US\$/m ²

4) Aplicación del sello		
1 Sello superficial con grava fina	2,00	US\$/m ²

Resumen de costos		
Recicladora	2,00	US\$/m ²
Cemento 1,5 %	0,20	US\$/m ²
Emulsión asfáltica 5 %	1,90	US\$/m ²
Sello	2,00	US\$/m ²
Costo total	6,10	US\$/m ²

Opción 3(ii) Reciclaje en frío de 100 mm, con asfalto espumado y cemento

Esta opción es similar a la 3(i). Se empleará 3 % de asfalto espumado en lugar del 5 % de emulsión asfáltica. El contenido de cemento y el sello permanecen iguales a los de la opción 3(i).

1) Recicladora		
1 Máquina recicladora y equipo complementario	2,00	US\$/m ²

2) Incorporación de cemento		
1 Espesor de la capa reciclada	100,00	mm
2 Densidad del material reciclado	1,90	t/m ³
3 Cemento por incorporar	1,50	%
4 Tarifa del cemento	70,00	US\$/t
5 Costo del cemento ($\frac{\text{Ítem 1}}{1000} \times \text{Ítem 2}$) \times ($\frac{\text{Ítem 3}}{100} \times \text{Ítem 4}$)	0,20	US\$/m ²

3) Incorporación del cemento asfáltico espumado		
1 Espesor de la capa reciclada	100,00	mm
2 Densidad del material reciclado	1,90	t/m ³
3 Cemento asfáltico espumado por incorporar	3,00	%
4 Tarifa de la emulsión asfáltica	200,00	US\$/t
5 Costo del cemento asfáltico espumado ($\frac{\text{Ítem 1}}{1000} \times \text{Ítem 2}$) \times ($\frac{\text{Ítem 3}}{100} \times \text{Ítem 4}$)	1,14	US\$/m ²

4) Aplicación del sello		
1 Sello superficial	2,00	US\$/m ²

Resumen de costos		
Recicladora	2,00	US\$/m ²
Cemento 1,5 %	0,20	US\$/m ²
Cemento asfáltico espumado, 3 %	1,14	US\$/m ²
Sello	2,00	US\$/m ²
Costo total	5,34	US\$/m ²

Wirtgen GmbH y A.A. Loudon & Partners se han esmerado en la preparación de este manual para asegurar que contiene los conocimientos más actualizados sobre el tema. Además, este conocimiento ha sido evaluado y confirmado bajo condiciones de campo.

La aplicación del material incluido en este manual para el diseño de obras de ingeniería requiere de criterio y experiencia de parte del consultor. De acuerdo con ello, Wirtgen GmbH y A.A. Loudon & Partners no asumen ninguna responsabilidad por las deficiencias o fallas en el comportamiento del pavimento que resulten del análisis, diseño o aplicación inadecuadas del contenido de este manual.

ISBN 3-936215-01-4



9 783936 215021