



Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias de la Ingeniería
Escuela de Construcción Civil

“GUÍA PARA DISEÑAR LA REHABILITACIÓN DE UNA RUTA MEDIANTE EL USO DE ASFALTO ESPUMADO; RECICLANDO EL PAVIMENTO ASFÁLTICO EXISTENTE”

Tesis para optar al título de:
Ingeniero Constructor.

Profesor Guía:
Sr. Luís Collarte Concha.
Ingeniero Civil. M. Sc. en Ingeniería Civil.
Especialidad Hidráulica Mecánica de Suelos.

RICARDO ARNOLDO ROBLES DIAZ
VALDIVIA-CHILE
2009

Agradecimiento:

A todos quienes hicieron posible de una u otra manera éste logro en mi vida, ya sea entregándome un consejo, apoyándome académicamente o simplemente estando a mi lado en todo momento, principalmente a mis padres, hermano, abuelita, sobrinas y a ti amor, que siempre me han entregado toda su comprensión, valores y sabiduría para alcanzar esta meta y poder empezar una nueva etapa... “todo lo que soy es gracias a ustedes”.

Los amó.

Dedicado:

*Con todo mi amor a mi familia y en especial a
mis queridas sobrinitas Francita y Kokita, que
pronto estaremos juntos nuevamente...*

RESUMEN

Este trabajo nos entrega una guía para el estudio y diseño de rehabilitación de un pavimento mediante el uso de asfalto espumado. El empleo del pavimento asfáltico existente, es decir, el reciclado de éste, nos lleva a trabajar con la tecnología de reciclado en frío in-situ para el cual se desea emplear como ligante el asfalto espumado y así lograr la rehabilitación final del pavimento, reduciendo el consumo energético y costos del proyecto.

Un proyecto de esta índole necesita un estudio amplio de las condiciones actuales, características, materiales utilizados y tratamientos que se le hayan efectuado a la ruta a rehabilitar, además de diseñar un reciclado que se ajuste a las necesidades y especificaciones del mandante en lo referente a la estructura del pavimento y a lo económico.

La gran tecnología en maquinaria que existe hoy en día en el mercado nos lleva a reciclar una gran cantidad de material, lo cual nos ayuda a cuidar y proteger el medio ambiente en que vivimos, pues no se explotan nuevos yacimientos y además se reducen las molestias a los usuarios de la ruta.

SUMMARY

This work gives us a guide for study and design of a pavement rehabilitation using foamed asphalt. The use of the existing asphalt pavement, ie, recycling of this, leads us to work with the technology of in-situ recycling cold for which is desired to use as foamed asphalt binder and the final rehabilitation of the pavement, reducing energy consumption and costs for the project.

A project of this nature requires a comprehensive study of current conditions, features, materials used and treatments made to the road to rehabilitate, plus a recycled design that fits the needs and specifications of the client regarding pavement structure and economics.

The high tech equipment that exists today in the market leads us to recycle a large amount of material, which helps us to care for and protect the environment we live in, as new deposits are not exploited and also reduce the discomfort to road users.

INDICE

RESUMEN.

INTRODUCCION.

OBJETIVOS.

CAPÍTULO I: REHABILITACIÓN DE PAVIMENTOS.

1.1 Generalidades.	1
1.2 Procedimiento de diseño para la rehabilitación de pavimentos.	1
1.3 Adquisición de Datos y Procesamiento de la Información disponible.	5
1.3.1 Información del pavimento existente.	5
1.3.2 Diseño de tráfico.	6
1.4 Investigaciones Preliminares.	7
1.4.1 Determinación de secciones homogéneas.	8
1.4.2 Método de las Deflexiones.	8
1.4.3 Evaluación visual.	10
1.5 Investigación Detallada.	11
1.5.1 Excavación de calicatas.	11
1.5.2 Extracción de testigos.	13
1.5.3 Ensayos de laboratorio.	13
1.5.4 Cono de penetración dinámica (DCP).	13
1.5.5 Medidas de la profundidad del ahuellamiento.	14
1.5.6 Síntesis de todos los datos disponibles.	15

CAPITULO II: RECICLADO EN FRIO.

2.1 Generalidades.	16
2.2 Reciclado In-situ.	17
2.3 Aplicaciones de reciclado en frío.	20
2.3.1 Reciclado del 100% de RAP.	20
2.3.2 Estabilización con RAP / base granular.	22
2.3.3 Pulverización.	24
2.3.4 Reprocesamiento.	24
2.3.5 Modificación de propiedades mecánicas.	25

2.4 Beneficios del Reciclado en Frío	26
2.5 Aplicabilidad del Proceso de Reciclado en Frío.	28

CAPÍTULO III: AGENTES ESTABILIZADORES.

3.1 Tipos de Agentes Estabilizadores.	31
3.1.1 Generalidades.	31
3.1.2 Agentes estabilizadores asfálticos.	32
3.2 Estabilización con Asfalto Espumado.	33
3.2.1 Generalidades.	33
3.2.2 Características del asfalto espumado.	35
3.2.2.1 Factores que influyen a las propiedades de la espuma.	37
3.2.2.2 Características aceptables de espumado.	39
3.2.2.3 Dispersión del asfalto espumado.	39
3.2.3 Material adecuado para tratamiento con asfalto espumado.	40
3.2.4 Muestras de material utilizadas para el diseño de mezclas.	42
3.2.5 Propiedades típicas de materiales estabilizados con asfalto espumado.	43
3.2.5.1 Resistencia.	44
3.2.5.2 Rigidez.	45

CAPÍTULO IV: DISEÑO DE MEZCLAS DE AGREGADOS CON CEMENTO ASFÁLTICO ESPUMADO

4.1 Generalidades.	46
4.2 Aparatos.	46
4.3 Optimización de las propiedades del asfalto.	49
4.4 Preparación de los agregados pétreos.	49
4.5 Tratamiento de los agregados con asfalto espumado.	50
4.6 Contenido de Humedad y Asfalto.	51
4.7 Compactación de las muestras de asfalto espumado.	51
4.8 Curado.	52
4.9 Determinación del peso específico aparente de las probetas compactadas.	52
4.10 Determinación de la Resistencia a la Tracción Indirecta.	52

4.11	Determinación del contenido de Ligante de Diseño.	55
4.12	Cancha de Prueba.	55

CAPÍTULO V: PROCEDIMIENTO DE TRABAJO CON ASFALTO ESPUMADO.

5.1	Equipos.	56
5.2	Proceso Constructivo.	57
5.2.1	Proceso de Estabilización.	57
5.2.2	Compactación y Terminación.	59
5.2.3	Limitaciones metereologicas.	61
5.2.4	Control de Obra.	61
5.2.5	Condiciones Medioambientales y de Seguridad.	62

CAPITULO VI: EJEMPLO DE PROYECTOS DE RECICLADO DE PAVIMENTOS CON ASFALTO ESPUMADO.

6.1	Generalidades.	63
6.2	Proyectos.	63
6.2.1	Reposición ruta R-86 IX región de Chile.	63
6.2.1.1	Datos del proyecto.	63
6.2.1.2	Pavimento existente.	64
6.2.1.3	Maquina recicladora.	65
6.2.1.3	Procedimiento de trabajo.	65
6.2.1.4	Estado actual.	67
6.2.1.5	Rendimiento mezcla recicladora.	67
6.2.1.6	Diseño mezcla recicladora.	68
6.2.2	Carretera para alto trafico en Arabia Saudita.	69
6.2.3	Saneamiento de las vías a lo largo de la red de canales en el distrito Los Baños de Estados Unidos.	70

6.2.4 Rehabilitación de una autopista en el Irán, bajo condiciones extremas.	71
6.2.5 Reciclado con asfalto espumado en carretera de alto tráfico en Brasil.	72
6.2.6 Reciclado con asfalto espumado en proyecto de saneamiento en Noruega.	73
ANEXO I: EQUIPO RECICLADOR	
A1. Recicladora WR 2500 S	75
A1.1 Sistemas de nivelación.	76
A1.2 Tracción de la recicladora.	77
A1.3 De dirección versátil y universal.	78
A1.4 Accionamiento mecánico del tambor convierte fuerza en rendimiento.	78
A1.5 Rendimiento de fresado.	79
A1.6 Calidad homogénea de mezcla.	79
A1.7 Un equipo eficiente: el conductor y el ordenador.	80
A1.8 Instalaciones de inyección.	81
A1.9 La dosificación de emulsión.	82
A1.10 El asfalto espumado requiere una tecnología de procesos perfeccionada.	84
A1.10.1 Instalación para producir y dispersar asfalto espumado.	85
A1.11 Mantenimiento.	86
A1.12 Transporte y limpieza.	87
CONCLUSION	89
BIBLIOGRAFIA	91

INTRODUCCION

La rehabilitación de los caminos mediante el asfalto espumado toma fuerza durante la década de los 90, a pesar de que en el año 1956 el profesor Ladis Csanyi en la Estación Experimental de Ingeniería en la Universidad Estatal de Iowa descubriera el potencial del asfalto espumado como agente estabilizador.

Las mezclas con asfalto espumado en comparación con mezclas tradicionales presentan ventajas desde el punto de vista energético y ambiental, además pueden ser usados una gran variedad de materiales ya sean gravas chancadas de buena calidad hasta suelos marginales y materiales reciclados.

En cuanto a la producción del asfalto espumado este se realiza mediante un proceso en el cual se le inyecta una pequeña porción de agua al asfalto caliente dentro de una cámara de expansión, logrando la espuma que se mantiene por un periodo de 10 a 30 segundos, para luego volver a su volumen original, durante este periodo se debe mezclar la espuma con el agregado para que las gotas de asfalto aglutinen las partículas mas finas y así generar una pasta que sirve de mortero entre las partículas gruesas.

El asfalto espumado se caracteriza básicamente por dos propiedades las cuales son: razón de expansión y vida media. Además existen dos aplicaciones para este tipo de asfalto:

- El reciclado en frío de pavimentos: que radica en la recuperación del pavimento existente, el que mezclado con el asfalto espumado y otros agregados como cemento, cal o agregados nuevos producen una base asfáltica.
- Estabilizador de suelos: consiste en la mezcla de asfalto espumado con material reciclado de caminos sin pavimentar o nuevos pozos. Este método permite obtener mezclas a bajo costo.

Para llevar a cabo todo este procedimiento de rehabilitación mediante el reciclaje se debe contar una maquina fresadora- mezcladora capaz de pulverizar y de inyectar el asfalto espumado mediante cámaras de expansión, la mezcla ya extendida sobre el camino se nivela y compacta mediante rodillos lisos vibratorios y rodillo neumático.

Antes de empezar a ejecutar un proyecto de rehabilitación mediante asfaltos espumados se debe recopilar una serie de datos que nos serán útiles a la hora de diseñar el proyecto, tales como: espesor de las capas construidas, materiales utilizados en las capas, trafico del camino, ancho de vías, deterioros presentes, etc. Además se deberán extraer testigos del camino para ensayos de Resistencia a la Tracción Indirecta (ITS) y el Módulo Resiliente (MR).

Al tener estos datos debemos determinar otros factores para poder diseñar, tales como: si queremos lograr una vida de diseño a largo o corto plazo, que calidad de rodadura pretendemos obtener, el nivel de financiamiento que se otorgo al proyecto, entre otros.

OBJETIVOS

- Entregar una guía para realizar un diseño práctico de un pavimento asfáltico en la cual se entreguen conocimientos sobre la rehabilitación de pavimentos, reciclado en frío in-situ y la tecnología de asfalto espumado, procesos para los cuales se debe manipular herramientas de laboratorio y maquinaria de reciclado. Con esta tecnología de reciclado en frío in-situ se busca aprovechar los materiales existentes y ayudar con la conservación del medio ambiente, disminuyendo considerablemente el consumo de energía.
- Recopilar los distintos parámetros que se deben tener al momento de comenzar el estudio para diseñar y ejecutar una rehabilitación de pavimento, como características de la ruta y la finalidad que esta rehabilitación busca.
- Estudiar el funcionamiento del reciclado en frío in-situ, en especial conocer sus propiedades, equipos utilizados y ventajas del sistema.
- Instruirse de la tecnología del Asfalto Espumado, sus características, usos, aplicaciones, procedimiento de trabajo y ventajas.

CAPÍTULO I: REHABILITACIÓN DE PAVIMENTOS

1.1 Generalidades.

Normalmente, la rehabilitación de pavimentos se requiere cuando un camino se encuentra próximo a su condición final, debido a deterioros en la estructura del pavimento, o cuando el pavimento requiere una mejora debido al aumento del volumen de tráfico. Cuando un camino pavimentado es diseñado apropiadamente, y es constantemente protegido con mantenimiento rutinario y recapados, la necesidad de rehabilitación estructural puede ser considerablemente minimizada. Sin embargo, en la práctica, el mantenimiento requerido no se realiza con frecuencia, haciendo necesaria la rehabilitación tan pronto como sea pronosticada.

1.2 Procedimiento de diseño para la rehabilitación de pavimentos.

La rehabilitación de pavimentos sólo puede ser realizada después de identificar una necesidad de acción. Esto es seguido a nivel de proyecto recolectando la información disponible y realizando una investigación detallada, acompañada por un diagnóstico de experto para determinar la causa del deterioro. El proceso de diseño de rehabilitación total de pavimentos incluye análisis de tráfico, identificación de las opciones de rehabilitación, diseño de mezclas y un detallado diseño de pavimentos antes de determinar la solución óptima de rehabilitación. Sin embargo, previo a describir el marco dentro del cual puede ser realizada adecuadamente la rehabilitación de pavimentos, es importante reconocer las siguientes dos reglas de oro aplicables a todas las acciones de rehabilitación:

Regla 1: Debe haber un claro entendimiento de lo que las autoridades esperan del camino rehabilitado.

Esto requiere responder a tres preguntas claves:

- ¿Se requiere una vida de diseño a corto o largo plazo?
- ¿Qué estándar de propiedades funcionales, tal como calidad de rodadura, es esperado?
- ¿Qué nivel de financiamiento debe ser proporcionado para el mantenimiento rutinario del pavimento durante su vida de diseño? Por ejemplo, ¿se espera que el pavimento este sin necesidad de mantenimiento durante su vida de diseño?, ¿cuáles son las capacidades de mantenimiento locales, en términos de mano de obra, equipo y conocimiento?

Regla 2: Se deben realizar suficientes investigaciones para adquirir información sobre el comportamiento del pavimento existente, y del modo en que éste se deteriora.

Estas reglas entregan el contexto para el proceso completo de rehabilitación de pavimentos. El tipo y alcance del trabajo de investigación de pavimentos dependerá de la información requerida para un proyecto específico, y es esencial una interacción entre la investigación y el proceso de diseño. Los diseños de pavimentos pueden ser adaptados para una amplia variedad de caminos, desde caminos no pavimentados con bajo volumen de tráfico, hasta autopistas de alto tráfico. Estos deben satisfacer los requerimientos específicos de las autoridades con respecto a la vida de diseño y al estándar funcional. Por lo tanto, la atención debe permanecer sobre la exigencia del producto final en todas las partes del proceso de diseño.

Un diagrama de flujo generalizado es útil como guía de los pasos a seguir en el proceso de diseño de rehabilitación.

El diagrama de flujo presentado en la Figura N°1 es aplicable prácticamente a todos los proyectos de rehabilitación y puede ser adaptado de acuerdo a las necesidades específicas. Las actividades incluidas en este diagrama son las siguientes:

- Adquisición de datos.
- Investigación preliminar.
- Investigación detallada.
- Opciones preliminares de diseño de rehabilitación de pavimentos.
- Diseño de mezclas en laboratorio para material reciclado.
- Finalización del diseño de pavimentos.
- Análisis económico para seleccionar la mejor opción.

Luego se describen las actividades del diagrama de flujo de rehabilitación.

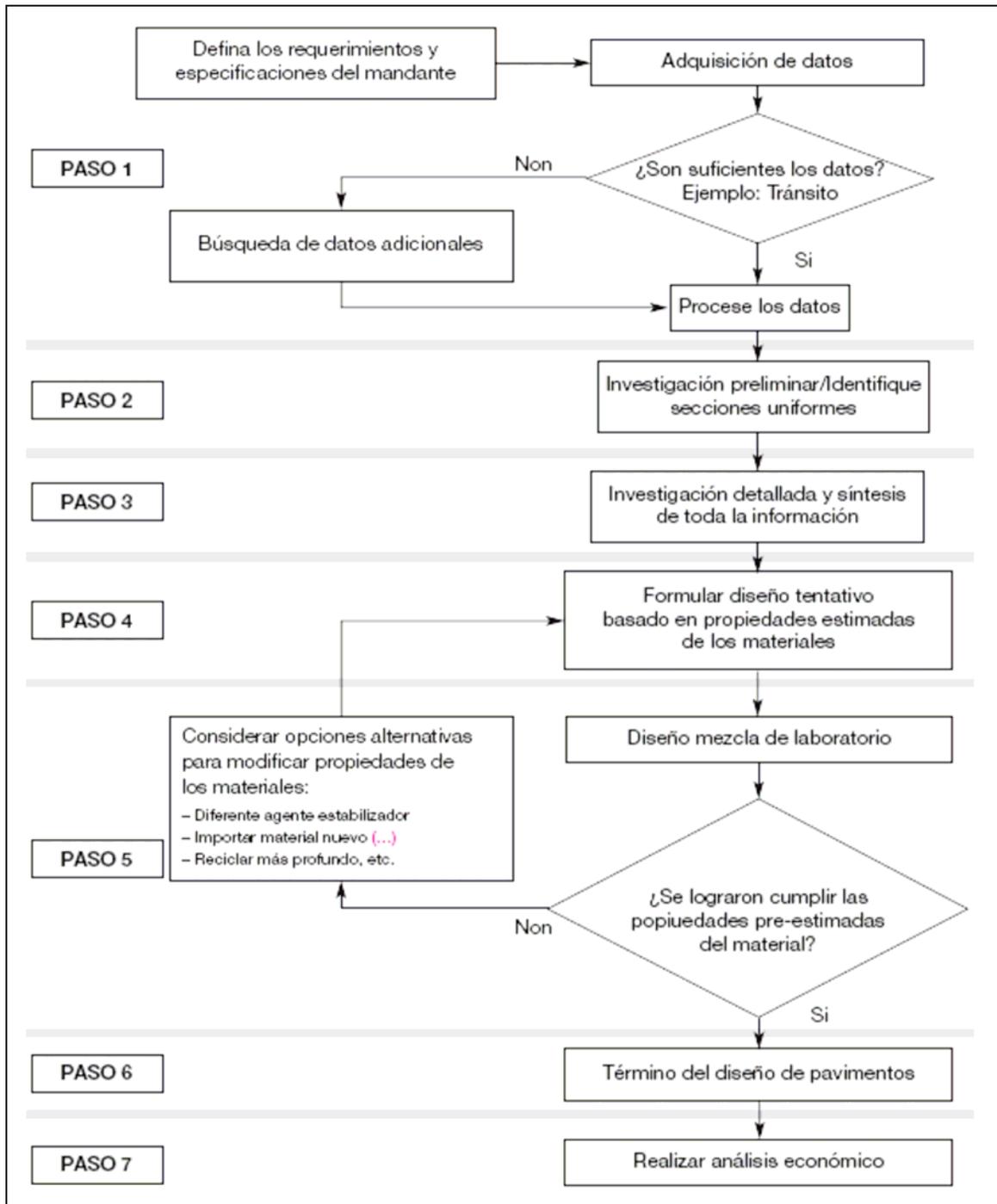


Figura N°1, Diagrama de flujo para proyectos de rehabilitación.

1.3 Adquisición de Datos y Procesamiento de la Información disponible.

El diseño de rehabilitación de pavimentos debe estar basado en información confiable y apropiada. La adquisición de datos se clasifica en:

- Información histórica.
- Vida de servicio requerida para el pavimento rehabilitado. Esto requiere un análisis anticipado del tráfico.

1.3.1 Información del pavimento existente.

Cuando se encuentren disponibles, los registros deben ser estudiados para determinar:

- Diseño de pavimentos especificado originalmente.
- Espesor de las capas construidas, junto con algunos cambios para especificar el diseño de pavimentos.
- Detalles de los materiales utilizados en la construcción de las capas del pavimento original, así como las rehabilitaciones posteriores o mejoras.
- Resultados del proceso y prueba de aseguramiento de calidad obtenidos de registros de construcción.
- Fuente y calidad del material disponible de canteras locales y empréstitos.
- Datos históricos de tráfico.
- Datos geológicos a lo largo del camino.
- Registros meteorológicos señalando modelos climáticos experimentados desde que el camino fue construido inicialmente.

Debe obtenerse la mayor cantidad de información posible ya que esta ayuda a contextualizar el proyecto y entregar una apreciación preliminar de lo que se puede esperar cuando comience la investigación en terreno.

1.3.2 Diseño de tráfico.

El volumen y tipo de tráfico que tendrá un camino durante su vida de diseño dicta las exigencias del pavimento. Sin embargo se necesitan estadísticas anticipadas de tráfico (en términos de números de vehículos, configuración y peso por eje) para determinar las exigencias estructurales para la rehabilitación. Esto es conocido como la “capacidad estructural” del pavimento, y se define como la cantidad y tipo de carga a la cual puede estar sometido el pavimento antes de fallar. La capacidad estructural es expresada en términos de millones de “Ejes Equivalentes” (Equivalent Standard Axle Load ESAL, ej. 5×10^6 ESALs).

La capacidad estructural es denominada a menudo como el “tráfico de diseño” o la “capacidad de soporte” de un pavimento, los cuales poseen el mismo significado con el fin de que todos estos términos sean citados en millones de ESALs.

Por lo tanto, los pavimentos son diseñados para una capacidad estructural específica. Aunque la vida de diseño es generalmente calculada en años, los pavimentos son actualmente diseñados para resistir las cargas de tráfico estimadas en este periodo. Por lo tanto, cualquier cambio imprevisto del tráfico estimado, causará un impacto en la vida de diseño.

Cuando es evidente que los datos de tráfico son insuficientes, particularmente al diseñar la rehabilitación de pavimentos con tráfico pesado, se debe obtener información adicional. Se debe contabilizar el tráfico para obtener una estimación exacta del porcentaje de vehículos pesados que usan habitualmente el camino. La información respecto a la dispersión del tráfico (configuración de los vehículos),

presión de los neumáticos y cargas por eje, debería ser registrada durante el conteo de tráfico. Además las predicciones del volumen y tipo de tráfico futuro, deben ser obtenidas de las autoridades correspondientes.

Siempre debe tenerse presente que la información utilizada para calcular el diseño de tráfico (capacidad estructural) es dependiente del incremento de tráfico, factores de deterioro y otros datos que pueden no ser exactos.

Análisis de tráfico detallados son esenciales para el diseño de pavimentos donde se requiere una estrategia de diseño a mediano y largo plazo (típicamente cuando la vida de diseño excede los diez años). Para estrategias a corto plazo raramente es necesario elaborar un análisis de tráfico. Sin embargo, la información sobre volumen de tráfico es útil para planificar el trabajo, reducir las dispersiones del tráfico durante la construcción y minimizar el deterioro de las capas rehabilitadas que pueden estar sujetas al tráfico en una etapa temprana.

Una vez que toda la información ha sido obtenida y se ha definido la capacidad estructural, se puede continuar con la investigación preliminar.

1.4 Investigaciones Preliminares

Los caminos pavimentados usualmente no son homogéneos en distancias largas. Tanto la geografía subyacente, como los materiales utilizados en la construcción de las capas individuales (estructura del pavimento) varían a lo largo del proyecto. Además, un camino incluye una serie de secciones diferentes de varias longitudes, cada una con similar composición y comportamiento en respuesta a las cargas de tráfico. Estas son caracterizadas generalmente por síntomas similares de deterioro. Estas secciones son conocidas como “secciones homogéneas” y pueden ser tan cortas como unos cientos de metros o tan largas como varios kilómetros.

1.4.1 Determinación de secciones homogéneas.

La clave para investigar el deterioro del pavimento es la identificación previa de estas secciones homogéneas. Una vez identificadas, el camino se divide en una serie de secciones. Secciones con deterioro similar y estructuras de pavimento pueden ser agrupadas para propósitos de investigación detallados.

El objetivo principal de emprender una investigación preliminar es la definición de secciones homogéneas. Esto se logra usualmente analizando la información disponible, incluyendo cualquier tipo de dato de deflexión, y desarrollando una inspección visual. Síntomas similares de deterioro y/o medidas de deflexión indican condiciones similares en la estructura de pavimentos subyacentes. Esta información se utiliza para identificar:

- Los límites entre las distintas secciones homogéneas
- El tipo de deterioro (indicando el modo de falla)

1.4.2 Método de las deflexiones.

La medida de deflexión es una herramienta no destructiva muy poderosa para la evaluación del pavimento. La técnica principal es usar una carga, un impulso (impacto) o una rueda cargada conocida que simule un vehículo pesado, y medir la respuesta del pavimento. Cuando se aplica una rueda cargada a la superficie del camino, el pavimento se deflece. La cantidad de deflexión que ocurre bajo la carga y la forma del “cuenco de deflexiones” producido por la carga, entrega un medio útil de evaluación de las propiedades del pavimento in-situ. La Figura N°2 ilustra este principio.

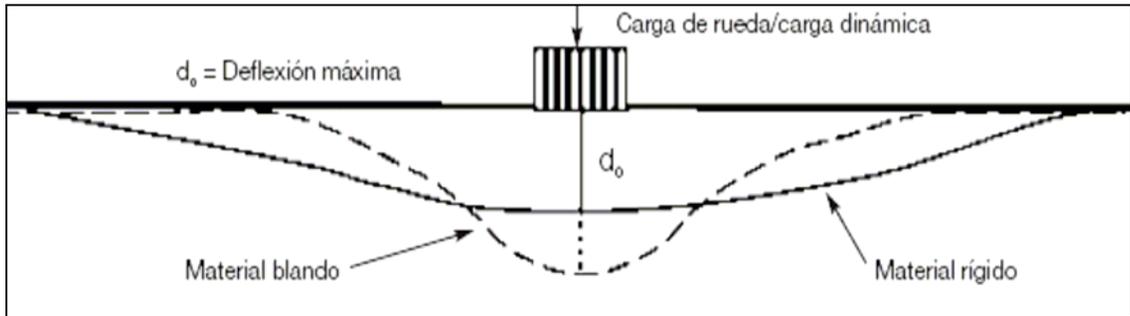


Figura N°2, Método de deflexiones.

Han sido desarrollados varios métodos para medir la respuesta del pavimento bajo carga, principalmente para usarla como un indicador de la condición estructural y la capacidad de carga del pavimento. El método más utilizado es el Deflectómetro de Impacto.

La suma acumulada de las deflexiones máximas (u otros índices relevantes) son calculadas usando la ecuación N°1:

$$S_i = [d_i - D] + S_{i-1}$$

Ecuación N °1, Suma acumulada de deflexiones máximas.

Donde:

S_i = valor de la suma acumulada en la situación i

d_i = deflexión máxima en la situación i

D = deflexión máxima media para la sección completa.

El valor de la suma acumulada es graficado para cada situación respectiva. Una pendiente relativamente constante indica secciones del pavimento con respuestas similares, o secciones homogéneas.

1.4.3 Evaluación visual.

Las evaluaciones visuales son realizadas normalmente caminando o, en proyectos largos, conduciendo lentamente a lo largo de la sección del camino a ser evaluada. Cuando la evaluación se realiza conduciendo, frecuentemente es necesario detenerse para realizar inspecciones más de cerca.

Se toman notas detalladas de todos los deterioros evidenciados en la superficie del pavimento y otras observaciones como drenaje, cambios geológicos y características geométricas (pendientes abruptas, curvas cerradas y altos terraplenes). Los modelos de deterioro reconocidos durante la inspección, deben ser clasificados dentro de las tres categorías mostradas en la tabla N°1

DETERIORO OBSERVADO	TIPO DE DETERIORO	DESCRIPCION
Daño superficial	Daño ambiental	Pérdida áridos superficial, daño por oscilación térmica
	Daño al transito	Perdida de árido superficial, exudación, pulido
Daño estructural	Deformación	Ahuellamiento
	Agrietamiento	Longitudinal, cocodrilo, etc.
	Daño avanzado	Baches, desprendimiento del borde
Condición funcional	Drenaje	Erosión
	Calidad de rodado	Ondulación, corrugaciones

Tabla N°1, Modelos de deterioros.

Durante la inspección, los diferentes modelos y tipos de deterioros del pavimento son descritos de acuerdo a su severidad, frecuencia y posición. La inspección visual entrega indicaciones valiosas respecto a las causas de deterioro del pavimento dado que los modelos de falla llegan a ser elementales una vez resumidos.

1.5 Investigación Detallada.

Para cada sección homogénea se requiere una investigación detallada para evaluar la estructura del pavimento existente (componentes y modo de deterioro) y para determinar el soporte de la subrasante in-situ. Métodos típicamente utilizados son descritos más abajo.

1.5.1 Excavación de calicatas.

La excavación de calicatas en un pavimento existente es una de las partes más importantes de cualquier investigación de pavimentos. Además para lograr una apreciación visual útil de las capas y materiales en la estructura del pavimento, las calicatas proporcionan una oportunidad de tomar muestras para ensayos de laboratorio. Estas muestras pueden ser ensayadas para evaluar la calidad de los materiales en las capas del pavimento existente y proveer material para el diseño de mezclas, resultados que son utilizados para establecer los tratamientos más efectivos para los materiales a ser reciclados.

Las calicatas también permiten la determinación de:

- espesor de las capas individuales del pavimento
- contenido de humedad in-situ
- densidad precisa in-situ (grado de compactación) de cada capa
- estado de varias capas (ej. Grado de agrietamiento, cementación o carbonatación de cualquier capa estabilizada con cemento).

Las calicatas son excavadas generalmente en la huella exterior de la pista de tráfico y algunas veces es ubicada en el límite de la pista de tráfico con la berma. Las

calicatas son usualmente de 1.2 m de largo, 1 m de ancho y excavadas a 1 m de profundidad. Además se puede excavar una ranura superficial a través del ancho total de la pista de tráfico, con el fin de investigar la profundidad hasta la cual se prolonga la deformación y para determinar la extensión de cualquier ensanche del pavimento original.

El trabajo de excavación es realizado cuidadosamente para separar cada capa de diferente tipo de material. Cada tipo de material encontrado es amontonado separadamente junto a la excavación para luego ser mostrado. A medida que la excavación progresa, los ensayos de densidad pueden ser realizados en cada una de las capas en forma sucesiva, y las muestras ubicadas en contenedores sellados para determinar su contenido de humedad.

Una vez terminada la excavación, el perfil del pavimento determinado por las calicatas es registrado como se muestra en la Figura N°3, y las muestras representativas de material de cada capa son tomadas para realizar ensayos de laboratorio.

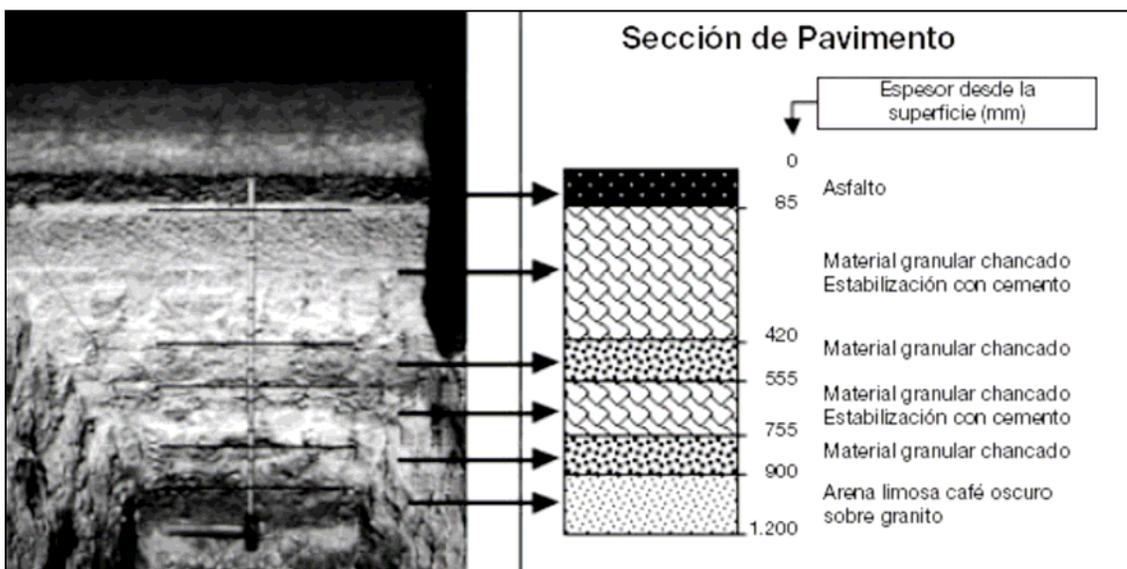


Figura N°3, Calicata.

1.5.2 Extracción de testigos.

Comparado con las calicatas, la extracción de testigos es relativamente más rápida y menos destructiva en cuanto a su extensión. Los testigos permiten chequear en forma precisa espesores de materiales, tales como asfalto y capas estabilizadas. Los testigos pueden ser fácilmente ensayados para conocer su composición volumétrica y propiedades de ingeniería.

La profundidad de la muestra es limitada por el largo de la broca utilizada para extraer el testigo.

1.5.3 Ensayos de laboratorio.

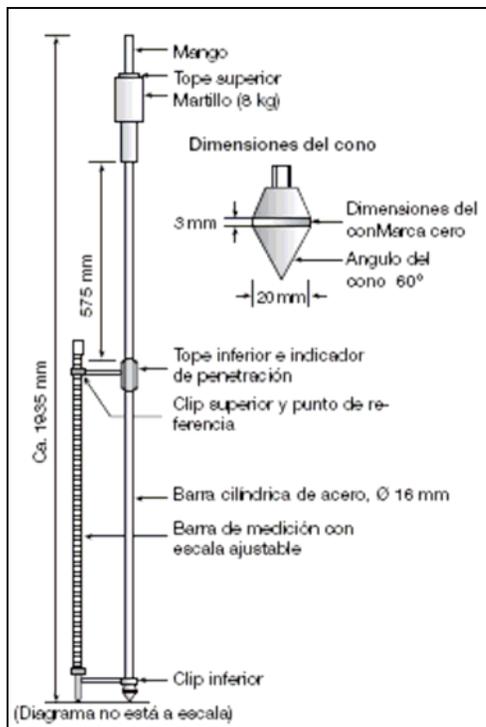
Las muestras tomadas desde calicatas y testigos son sometidas a ensayos de laboratorio para establecer la calidad de los materiales en las capas de pavimento existente y en la subrasante.

Los ensayos típicos incluyen: tamizado, límites de Atterberg, Razón de Comportamiento de California (CBR) y la relación humedad/densidad. Los resultados son usados principalmente para la clasificación de materiales, la cual entrega una indicación de los parámetros relevantes (ej. Módulo Elástico) a utilizar en el análisis de la estructura del pavimento existente. Estos también son útiles en la selección de las medidas apropiadas de rehabilitación, como la compatibilidad con diferentes agentes estabilizadores.

1.5.4 Cono de penetración dinámica (DCP).

El DCP es una herramienta simple que consiste en una barra de acero con una punta cónica de acero endurecida que es introducida en el pavimento utilizando un

martillo de peso estándar que se deja caer. La razón de penetración, medida en mm/golpe, entrega una indicación de la resistencia in-situ del material en las diferentes capas del pavimento. El DCP es introducido normalmente a una profundidad de 800 mm, o más en el caso de pavimentos con estructuras más duras. Esto permite obtener un perfil que indica las propiedades in-situ con respecto a la profundidad.



Los resultados del DCP pueden ser utilizados como una guía preliminar para obtener el módulo elástico de los materiales del pavimento in-situ.

Los resultados de una inspección con DCP son útiles para indicar el espesor de capas con resistencia uniforme dentro de la estructura del pavimento.

Figura N°4, Cono de penetración dinámico.

1.5.5 Medidas de la profundidad del ahuellamiento.

El principal propósito de medir la profundidad del ahuellamiento es evaluar la calidad funcional del camino.

El ahuellamiento es medido generalmente en forma manual usando un marco recto de 2.0 m de largo ubicado transversalmente a través de la huella en cada pista de tráfico. Se registra la máxima profundidad del ahuellamiento. El ahuellamiento también puede ser medido usando equipos auscultaciones móviles más sofisticados, que emplean técnicas de mediciones láser. Sin embargo, dado que el protocolo de

medición influencia las medidas reales de ahuellamiento, es importante establecer el método que fue empleado.

El ancho del ahuellamiento indica la fuente de deformación en la estructura del pavimento; ahuellamientos angostos indican deterioros superficiales del pavimento mientras que ahuellamientos anchos indican soportes de mala calidad de la capa subyacente. La correlación de la profundidad del ahuellamiento y las medidas de deflexión en un mismo punto, también ayudan a determinar si las capas superiores o inferiores en la estructura del pavimento se han deformado, e indican el curso de acción que es necesario seguir.



Figura N°5, Ejemplo de ahuellamiento.

1.5.6 Síntesis de todos los datos disponibles.

Los resultados de ensayos e inspecciones son típicos de una investigación extensa que incluye todos los detalles de la composición del pavimento y las características de los materiales. A partir de esta información se puede determinar la vida estructural remanente del pavimento e identificar la capa crítica con la menor capacidad estructural. Cuando se analiza en conjunto con la evaluación visual, puede ser identificado el modo de deterioro (falla) y las áreas problemáticas en la estructura del pavimento existente. Esto permite al ingeniero diseñador enfocarse en medidas de rehabilitación alternativas para indicar las debilidades identificadas y las áreas con problemas.

CAPITULO II: RECICLADO EN FRIO

2.1 Generalidades.

El reciclado en frío puede ser realizado en planta o in-situ. En planta, el reciclado se logra mediante el transporte del material recuperado de un pavimento existente a un depósito central, donde el material se trabaja con una unidad de procesamiento (como un mezclador continuo). In-situ, el reciclado se logra utilizando una máquina recicladora móvil. En general, el proceso en planta es la opción más cara en términos de costo por metro cúbico de material.

Esto se debe principalmente a los costos de transporte, que no existen en el reciclado in situ. Sin embargo, ambos métodos de reciclado tienen su nicho en la industria de la construcción y la decisión sobre cuál debe ser aplicado está definido básicamente por:

- Tipo de construcción: el proceso en planta habitualmente es considerado donde el material reciclado se puede utilizar en la construcción de un nuevo pavimento asfáltico, y en el refuerzo de un pavimento existente.
- El material in-situ del pavimento existente que va a ser reciclado: cuando el material de la capa superior de un pavimento existente va a ser reciclado, la variabilidad y/o condición del material en ocasiones requiere un proceso de selección o pre-tratamiento (por ejemplo, reducir el tamaño de una capa asfáltica gruesa).

En la actualidad, el tratamiento in-situ de los materiales de pavimentos es de uso generalizado, debido a la llegada de potentes máquinas recicladoras que pueden rehabilitar pavimentos a una fracción del costo de los métodos de reconstrucción

convencionales. Además, considerando la situación de los pavimentos a nivel mundial, la rehabilitación de pavimentos existentes excede ampliamente la demanda por caminos nuevos. Como consecuencia de esto, el reciclado in-situ ha sido adoptado en muchos países como el método recomendado para abordar el enorme trabajo pendiente en términos de rehabilitación de pavimentos.

2.2 Reciclado In-situ.

Las máquinas de reciclado han evolucionado a través de los años, desde las primeras máquinas modificadas para fresar y estabilizar de suelos, hasta las recicladoras especializadas utilizadas hoy en día. Estas recicladoras son especialmente diseñadas para lograr la capacidad de reciclar capas de pavimento de gran espesor en una sola pasada. Las recicladoras modernas tienden a ser máquinas grandes y potentes, las cuales pueden estar montadas sobre orugas o sobre neumáticos de flotación. El elemento más importante de una máquina recicladora es el rotor fresador-mezclador equipado con un gran número de puntas, especialmente diseñadas para este proceso. El tambor normalmente rota y pulveriza el material del pavimento existente, como se ilustra en la Figura N°6.

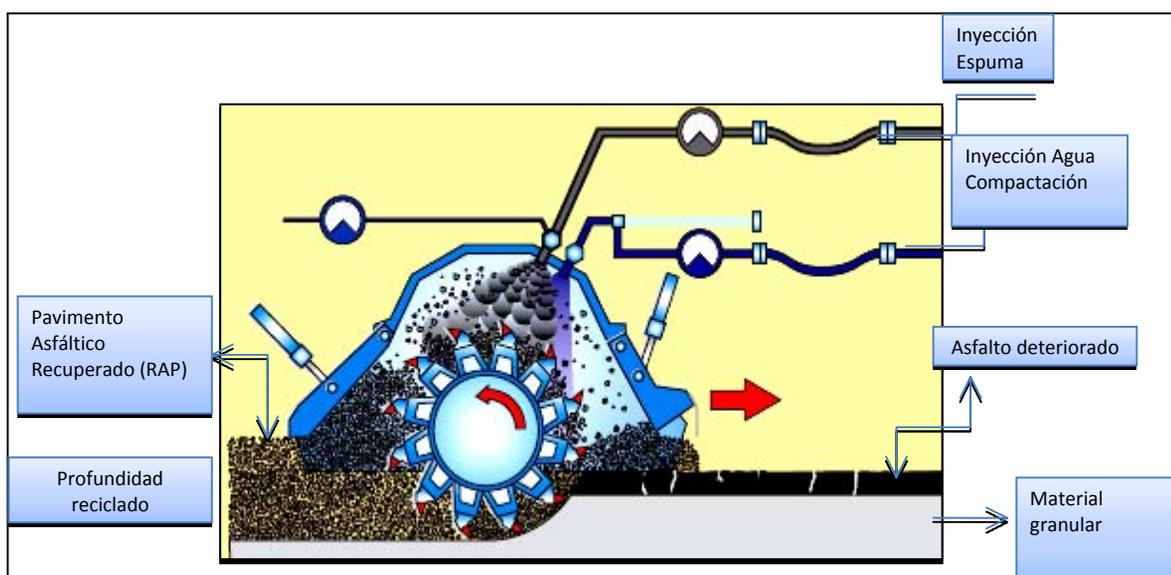


Figura N°6, Tambor pulverizador.

A medida que la máquina avanza con el tambor rotando, el agua de un tanque acoplado a la recicladora se llena mediante mangueras dentro de la cámara de mezclado de la recicladora. El flujo de agua es medido con precisión mediante un micro procesador controlado por un sistema de bombeo, mientras que el tambor mezcla el agua con el material reciclado para alcanzar el contenido necesario de humedad. De esta forma es posible conseguir altos niveles de compactación. Agentes estabilizadores líquidos, como lechada cemento / agua o emulsión asfáltica, tanto en forma separada como combinadas, pueden ser introducidas directamente a la cámara de mezclado de una forma similar. Además, el asfalto espumado puede ser inyectado dentro de la cámara de mezclado mediante una barra aspersora especialmente diseñada. Agentes estabilizadores poderosos, como la cal hidratada, son normalmente repartidos en la superficie del pavimento existente, delante de la recicladora. La recicladora pasa trabajando sobre el estabilizador en polvo, mezclando a éste con el material recuperado, para luego inyectarle agua, todo en una sola pasada.

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

El tren de reciclado presentado en la Figura N°7 se utiliza cuando el material es estabilizado con lechada de cemento. La tasa de aplicación requerida de cemento y agua se mide con exactitud antes de mezclarse para formar una lechada, la cual es bombeada a la recicladora mediante una manguera flexible y posteriormente inyectada dentro de la cámara pulverizadora. Alternativamente, el cemento puede

ser esparcido sobre el pavimento existente delante de la recicladora, sustituyendo el mezclador de lechada por un tanque de agua.



Figura N°7, Tren de reciclado con lechada.

El material que sale de la recicladora recibe la compactación inicial del rodillo pesado vibratorio para alcanzar una densidad uniforme en todo el material. Posteriormente el material se perfila con una motoniveladora antes de ser finalmente compactado utilizando un compactador neumático y un rodillo vibratorio.

Cuando la emulsión o el asfalto espumado se aplican junto con la lechada de cemento se configura un tren de reciclado similar al anterior, formado por un tanque suministrador de asfalto empujado delante del mezclador de lechada, como se ilustra en la Figura N°8. En los casos donde el cemento se esparce como polvo sobre la superficie del camino delante del tren de reciclado, el tanque de asfalto se acopla directamente a la recicladora y el tanque de agua es empujado, liderando el tren de reciclado. En el caso de utilizar una recicladora montada sobre orugas y equipada con placa compactadora, el uso de una motoniveladora para perfilar la superficie puede no ser necesario.



Figura N°8, Tren de reciclado con asfalto.

2.3 Aplicaciones de reciclado en frío.

El reciclado en frío es un proceso con múltiples aspectos que puede satisfacer muchas necesidades en el mantenimiento y rehabilitación en la infraestructura vial. Dependiendo en si el material es tratado o no con un agente ligante, se pueden identificar dos categorías de reciclado en frío. Luego, como un segundo grupo de clasificación, cada categoría puede ser a su vez categorizada por el tipo de tratamiento que el material recibe.

2.3.1 Reciclado del 100% de RAP (Pavimento Asfáltico Recuperado).

Esta categoría cubre exclusivamente el reciclado de material 100% RAP y requiere considerar los siguientes factores:

- Naturaleza y composición del pavimento existente (por ejemplo, tipo de mezcla asfáltica, granulometría, contenido de asfalto, envejecimiento, etc.).
- Tipo y causas del deterioro (por ejemplo, agrietamiento o deformación permanente).
- Severidad del deterioro (por ejemplo, aislado a la capa superficial o deterioro profundo).
- Objetivo de la rehabilitación (por ejemplo, restauración de la integridad estructural).

Existen dos tecnologías distintas que pueden ser aplicadas para reciclar el 100% del material RAP:

- Construcción de una capa de mezcla asfáltica en frío, mediante la adición de emulsión como un rejuvenecedor, a una capa reciclada delgada (normalmente de 100 mm de espesor o menos).
- Estabilización del RAP con cemento, emulsión o asfalto espumado en una capa más profunda (usualmente mayor a 100 mm).

El reciclado del 100% del material de RAP como una mezcla asfáltica en frío requiere el aporte de asfalto adicional en forma de emulsión. Esto es esencial en un proceso de rejuvenecimiento del asfalto. Sin embargo, agregar cemento asfáltico en una mezcla de concreto asfáltico sin estudiar las propiedades volumétricas del material reciclado requiere una aproximación de diseño cuidadosa. La granulometría de la capa reciclada será diferente a la del asfalto original, y además, la fracción fina en general está adherida al material reciclado.

Generalmente esto significa que una cantidad adicional de finos debe ser añadida a la mezcla mientras se realiza el proceso de reciclado.

Normalmente se requiere una superficie adecuada sobre la capa reciclada con el objetivo de alcanzar las propiedades funcionales, como la resistencia al deslizamiento y la calidad de rodado. Para caminos de tráfico menor, esto puede conseguirse con un riego con gravilla o con una capa de mezcla asfáltica en caliente delgada (< 40 mm). Si un mejoramiento de estándar es aplicado al pavimento para que este pueda soportar tráfico pesado, en ocasiones puede ser requerida una base asfáltica, además de la capa asfáltica superficial.

2.3.2 Estabilización con RAP / base granular

Esta categoría de reciclado es típicamente aplicada como una medida para tratar estructuras de pavimentos deterioradas compuestas por bases granulares y superficies asfálticas delgadas, constituidas tanto por concreto asfáltico como por varias capas de sellos superficiales. El deterioro en este tipo de pavimentos generalmente se manifiesta como capas asfálticas severamente agrietadas, capas granulares deformadas, y baches. El objetivo de añadir agentes estabilizadores mientras se recicla es recuperar la integridad estructural mediante el mejoramiento de las propiedades de ingeniería de los materiales recuperados, al mismo tiempo que es posible alcanzar una calidad de rodado óptima.

La estabilización Granular/RAP puede ser efectuada mediante el reciclado a distintas profundidades, generalmente entre 150 mm y 250 mm. Cuando la capacidad estructural necesita ser mejorada para ajustarse a mayores demandas de tráfico, la profundidad del reciclado puede incrementarse, alcanzando un aumento en el espesor de la nueva capa estabilizada. Sin embargo, es necesario que el pavimento existente tenga un espesor mínimo de material natural de buena calidad para aplicar esta alternativa. Los pavimentos deteriorados compuestos por capas estabilizadas (por ejemplo, con cemento o cal hidratada) también pueden ser reciclados.

Cuando una estrategia de rehabilitación de corto plazo es adoptada debido a restricciones presupuestarias, o cuando el deterioro del pavimento es causado por la mala capacidad de soporte de las capas superiores, la profundidad del reciclado debe reducirse. Existe siempre un mejoramiento significativo en la capacidad estructural del pavimento después de la estabilización. Esto se complementa con la

aplicación de una capa superficial de asfalto sobre la capa reciclada. Evitar el ingreso de agua en las capas inferiores mediante la estabilización, también ayudará a extender la vida útil del pavimento reciclado.

En esta categoría también se incluye el mejoramiento de los caminos sin recubrimiento superficial.

Generalmente, el mejoramiento de estándar de estos caminos no pavimentados se debe a:

- Razones económicas: usualmente, altos costos de mantenimiento están asociados a incrementos en las cargas de tránsito.
- Razones medio ambientales: la pérdida anual de agregados entre 25 mm y 35 mm es común en caminos no pavimentados, lo que requiere un aporte continuo de material de empréstito. Además, se ha demostrado que la generación de polvo de los caminos no pavimentados es dañina para la salud.
- Razones estratégicas: necesidades políticas gubernamentales.

El reciclado de las capas granulares superficiales existentes generalmente es realizado con agentes estabilizadores. La estabilización con emulsión o asfalto espumado habitualmente es realizada a una profundidad promedio de entre 125 mm a 150 mm más una capa superficial delgada, como un riego con gravilla o una lechada. Estabilizar con cemento o cal hidratada requiere que la profundidad del reciclado sea aumentada a 150-250 mm para alcanzar un producto similar en términos de vida estructural. Una aplicación adicional que cae dentro de esta categoría es la modificación del material plástico mediante el reciclado con cal hidratada. Durante el proceso de reciclado, sólo la cal requerida es agregada al

material recuperado para eliminar o reducir la plasticidad. Por lo tanto, la adición de cal no es considerada como una estabilización, ya que la razón de agregar este estabilizador no es conseguir un aumento en la resistencia del material, pese a que a largo plazo es posible conseguir algún incremento en la resistencia.

2.3.3 Pulverización

No siempre es necesario adicionar un agente estabilizador cuando se recicla un pavimento existente que contiene capas asfálticas gruesas. En ocasiones, las capas asfálticas gruesas que presentan un estado de agrietamiento por fatiga severo, se tratan mejor mediante la pulverización previa de la capa asfáltica completa. Posteriormente, se compacta este material para crear un “granular reconstituido”. La base asfáltica nueva y las capas superficiales se construyen sobre esta capa asfáltica reconstituida obteniéndose una estructura de pavimento “equilibrada”. Los pavimentos que incorporan capas deterioradas de base estabilizadas también pueden ser tratados en forma efectiva utilizando pulverización. Las capas ligadas deterioradas usualmente exhiben fallas tipo “en bloque”. En un comienzo, estas fallas se producen en forma espaciada, pero con el tiempo aumentan su frecuencia en la superficie del pavimento. Al pulverizar estos materiales, se elimina el potencial riesgo del reflejo de grietas en las capas que se construirán sobre el material pulverizado.

2.3.4 Reprocesamiento

Los caminos de grava o no pavimentados generalmente mejoran su estándar a caminos pavimentados sin la incorporación de agentes estabilizadores, sin embargo es beneficioso volver a trabajar y recompactar la capa superior del pavimento

existente para alcanzar una uniformidad adecuada antes de recapar con una nueva capa de material importado. A pesar de que no se agrega material asfáltico, la humedad del material in-situ normalmente requiere un ajuste. Esto es posible lograrlo con el procedimiento constructivo del reciclado, para asegurar que se consiga el nivel óptimo de compactación. Aplicar la técnica de reprocesamiento también es aplicable a los caminos nuevos construidos con materiales disponibles in-situ.

Si la subrasante existente es adecuada, la opción de reprocesamiento es un método equivalente a escarificar y recompactar, tradicionalmente utilizado en la construcción de caminos nuevos. De esta forma, es posible conseguir una capa homogénea y con propiedades de capacidad de soporte consistentes.

2.3.5 Modificación de propiedades mecánicas.

Investigaciones realizadas en pavimentos revelan que una de las causas del deterioro se debe a la graduación deficiente de los materiales que componen las capas superiores del pavimento.

Corregir la graduación es posible mediante la adición del material granular faltante para lograr una granulometría adecuada sobre la capa granular existente, antes de aplicar la técnica del reciclado. El contenido de humedad se ajusta durante el proceso de reciclado, para alcanzar las condiciones óptimas de compactación del material reutilizado. La modificación de las propiedades mecánicas puede ser utilizada en el tratamiento de materiales que presentan una plasticidad inaceptable. En algunos casos, es posible tratar arcillas que se encuentran en terreno, mediante el mezclado de materiales arenosos sin cohesión, reduciendo la plasticidad efectiva

del material existente. Esta técnica debe ser aplicada con cuidado, ya que la separación mecánica de partículas plásticas en realidad no produce ningún tipo de reducción química de la plasticidad y, a menos que la graduación de la arena sea compatible con la naturaleza y graduación del material plástico, el desempeño del material existente no necesariamente será mejor.

2.4 Beneficios del Reciclado en Frío.

Algunos de los beneficios más evidentes del reciclado en frío para la rehabilitación de pavimentos son:

- Factores medio ambientales. Se hace uso del 100% de los materiales del pavimento existente. No se necesita crear sitios de empréstitos de materiales, y el volumen del nuevo material que debe ser importado a la obra desde pozos de agregados es minimizado. Esto reduce los efectos en el medio ambiente, pues en la actualidad, y debido a los métodos tradicionales de construcción, es frecuente observar cortes de gran tamaño en cerros, para extraer materiales de construcción, los cuales son inevitables cuando se abre una zona para extraer materiales de empréstito. Además, el transporte es reducido en forma drástica. El consumo de energía total es reducido en forma considerable, así como el efecto destructivo de los vehículos de transporte en la red vial.
- Calidad de la capa reciclada. Se logra una alta y consistente calidad de mezclado de los materiales insitu con el agua y los agentes estabilizadores. La adición de fluidos es precisa debido al microprocesador que controla los

sistemas de bombeo. El material reciclado, más los aditivos, son mezclados en forma intensa en la cámara del tambor fresador-mezclador.

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

- Menores tiempos de construcción. Las recicladoras son capaces de producir con altas tasas de rendimiento que reducen significativamente los tiempos de construcción comparados con métodos alternativos de rehabilitación. Esta reducción de tiempos también disminuye los costos y generan un beneficio intangible para los usuarios del camino, ya que las interrupciones de tráfico son menores.

- Seguridad. Uno de los beneficios más importantes del proceso de reciclado en frío es la seguridad vial que es posible conseguir. El tren de reciclado completo se puede acomodar en el ancho de una pista. Por ejemplo, en caminos con dos pistas, el reciclado puede ser llevado a cabo a lo largo de una mitad del ancho del camino durante el día. El ancho completo del camino, incluyendo la pista completamente reciclada, puede ser abierto al tráfico al anochecer.

- Costo-efectividad. Los beneficios expuestos anteriormente se combinan para hacer del reciclado en frío una alternativa altamente atractiva para la rehabilitación de pavimentos en términos de costo-efectividad.

2.5 Aplicabilidad del Proceso de Reciclado en Frío.

Cuando se decide rehabilitar un pavimento deteriorado, los métodos que poseen una mejor relación costo-efectividad tienden a ser específicos para cada proyecto. Cada proyecto es único en términos de la estructura del pavimento existente y la calidad de los materiales que conforman los mismos. Por lo tanto, es importante utilizar la solución más apropiada y práctica para cada proyecto, tomando en cuenta los siguientes factores relevantes:

- Ubicación. La solución más efectiva para cada país o zona en particular está definida por el medio ambiente local, así como las condiciones de tráfico del proyecto. Si este es una calle urbana de alto tráfico donde sólo el trabajo nocturno está permitido, o si es un camino rural secundario sin pavimentar, y se debe aumentar su estándar. Soluciones y estándares de servicio muy distintos son requeridos en ambos casos extremos. Es importante tomar conocimiento de los estándares locales de la construcción de caminos, así como la percepción y aceptación de la población local de los niveles de servicio.
- Medio ambiente físico. La topografía y geología deberían ser tomadas en consideración cuando se determina el método apropiado para la rehabilitación de un camino. Específicamente, pendientes pronunciadas pueden hacer que algunos tipos de técnicas constructivas sean imposibles de aplicar en la práctica. El clima también juega un rol importante en la elección y aplicación de distintas soluciones. Las condiciones y soluciones en regiones desérticas con una escasa o nula precipitación serán distintas a las requeridas en proyectos de zonas lluviosas. El efecto de temperaturas

extremas, como el agrietamiento térmico inducido por los ciclos hielo-deshielo, también influyen en el tipo de solución adoptada.

- Disponibilidad de materiales. La factibilidad de varias opciones de rehabilitación es significativamente influenciada por la disponibilidad de materiales, especialmente los agentes estabilizadores. Estos deben ser provistos en cantidades suficientes y que alcancen niveles adecuados de calidad y consistencia. Las recicladoras utilizan grandes volúmenes de agentes estabilizadores y es necesario establecer una fuente de abastecimiento confiable de estos materiales.

CAPÍTULO III: AGENTES ESTABILIZADORES

El primer uso de agentes estabilizados registrado en la construcción de caminos corresponde a los romanos, hace dos mil años aproximadamente. Sumado a sus avanzados sistemas de pavimentación en bloques (adoquines), también usaban una forma de tratamiento con cal para mejorar la resistencia del pavimento frente al paso de vagones de transporte altamente cargados. Hoy en día, muchos de los diferentes tipos de agentes estabilizadores se utilizan mundialmente para mejorar las propiedades de los suelos naturales. Además de aumentar las propiedades de resistencia de un material, los agentes estabilizadores mejoran la durabilidad y el comportamiento frente a efectos del agua y el medioambiente.

En muchas partes del mundo, los materiales de buena calidad simplemente no están disponibles para la construcción de caminos. Los costos de transporte de importar material adecuado han promovido el desarrollo de técnicas de estabilización para poder utilizar los recursos localmente disponibles. En muchas ocasiones, las resistencias requeridas pueden obtenerse de un material local “marginal”, a través de la adición de pequeñas cantidades de agentes estabilizadores a un costo relativamente bajo. Estas técnicas son aplicables tanto al reciclado como a nuevas construcciones.

A través de la adición de un agente estabilizador, el material recuperado de un pavimento existente puede ser mejorado, eliminando así la necesidad de importar nuevos materiales que cumplan con las resistencias requeridas por la estructura de pavimento rehabilitada.

3.1 Tipos de Agentes Estabilizadores

3.1.1 Generalidades

Existe una variada gama de agentes estabilizadores. Estos incluyen compuestos químicos tales como cloruro de calcio, polímeros y productos derivados del petróleo y otros productos y agentes ligantes más convencionales, como cemento y asfalto. Todos ellos apuntan a alcanzar el mismo objetivo de ligar las partículas individuales de agregado para incrementar la resistencia y/o hacer el material más resistente al agua. Algunos son más efectivos que otros en materiales específicos, otros tienen claras ventajas de costo, pero todos tienen un nicho en el mercado, y la mayoría pueden ser aplicados de mejor manera utilizando máquinas de reciclado modernas.

A la hora de decidir que agente utilizar se debe tener presente los siguientes puntos:

- Precio. El costo unitario de estabilizar (normalmente expresado en términos de costo por metro cuadrado de superficie completada).
- Disponibilidad. Agentes estabilizadores específicos puede que no estén disponibles en algunas partes del mundo. Por ejemplo, las emulsiones asfálticas no se fabrican en algunos países.
- Características del material. Algunos agentes estabilizadores son más efectivos que otros en ciertos tipos de materiales. Por ejemplo, la cal debiera ser preferida por sobre el cemento para suelos de alta plasticidad ($IP > 10$).
- Políticas. Algunas autoridades de caminos tienen políticas rígidas relacionadas al uso de ciertos agentes estabilizadores, en muchas ocasiones influidas por malas experiencias pasadas.

3.1.2 Agentes estabilizadores asfálticos

Estabilizar con asfalto es una manera efectiva, desde el punto de vista de los costos, mejorar la resistencia de un material y reducir al mismo tiempo los efectos perjudiciales del agua. La estabilización asfáltica produce una capa relativamente flexible en comparación al mismo material tratado con cemento.

El material estabilizado con asfalto, con menos de 1,5 % en peso de cemento, no sufre del fenómeno de agrietamiento por retracción y puede ser abierto al tránsito inmediatamente debido a su resistencia inicial, lo cual previene la pérdida de áridos superficial o desgaste bajo la acción del tráfico. Sin embargo, mientras el material adquiere resistencia y se produce el proceso de curado los vehículos pesados (incluyendo a los compactadores), no deben ser estacionados en la capa terminada. Existen dos formas muy distintas de tratamiento que pueden ser logradas al utilizar una emulsión asfáltica:

- Proceso rejuvenecedor, aplicable a pavimentos antiguos con mezclas de asfalto en caliente. Al aplicar una emulsión asfáltica especialmente formulada al RAP se logra incorporar asfalto nuevo, permitiendo así que la mezcla sea colocada y compactada como una mezcla en frío. El criterio de diseño para tal proceso es esencialmente el mismo que para las mezclas asfálticas en caliente y los diseños de mezclas son realizados de acuerdo al método tradicional Marshall (con probetas de 100 mm de diámetro).

- Proceso de estabilización, aplicable a los materiales granulares. Las probetas de muestra son fabricadas usando una compactación tipo Proctor y todos los procedimientos de mezclas utilizan las propiedades de

resistencia para determinar el nivel de aplicación requerido. Siendo esencialmente un material granular “mejorado”, las capas de pavimento construidas de material estabilizado con asfalto deben tener espesores mayores a 100 mm.

3.2 Estabilización con Asfalto Espumado.

3.2.1 Generalidades.

El asfalto caliente (160 – 180 °C) se transforma en asfalto espumado cuando se mezcla con una pequeña cantidad de agua atomizada (típicamente un 2 % en masa) en una cámara de expansión especial. En el estado espumado (un estado temporal de baja viscosidad), el asfalto puede ser agregado y mezclado con los agregados a temperatura ambiente y con contenidos de humedad in-situ. El proceso de asfalto espumado es análogo al de un panadero batiendo la clara del huevo para formar espuma de baja viscosidad, antes de mezclarla con la harina. En el proceso de batido, la clara del huevo se transforma en burbujas de películas delgadas llenas con aire, ocupando así un volumen mucho mayor; un estado necesario para la distribución homogénea entre las partículas finas de harina, haciendo posible, de esta manera, alcanzar una mezcla consistente.

Cuando las partículas de agua entran en contacto con el asfalto caliente, la energía calórica del asfalto se transfiere al agua. Tan pronto como el agua alcanza su punto de ebullición ésta cambia de estado, y al hacerlo, crea una burbuja con una delgada película de asfalto llena con vapor de agua.

La primera persona en darse cuenta del potencial de usar asfalto espumado como agente estabilizador fue el profesor Ladis Csanyi en la Estación Experimental de

Ingeniería en la Universidad Estatal de Iowa en 1956. Esta tecnología fue refinada más tarde por la organización Mobil Oil que desarrolló la primera cámara de expansión para mezclar agua con asfalto para generar espuma. El sistema desarrollado a mediados de los '90 inyecta tanto aire como agua al asfalto en la cámara de expansión, como se muestra en la figura N°9.

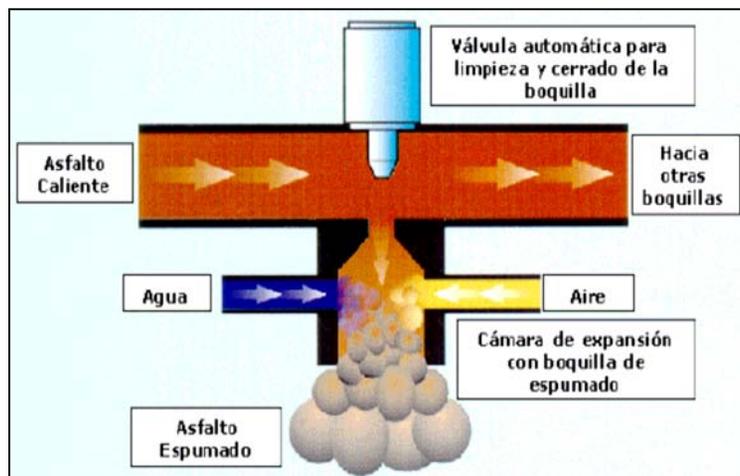


Figura N°9, Cámara de expansión.

El asfalto espumado puede ser utilizado como un agente estabilizador con una variedad de materiales, desde piedra chancada de buena calidad hasta gravas marginales con cierto grado de plasticidad. Las principales ventajas de estabilizar con asfalto espumado en comparación a la emulsión asfáltica son:

- Reducción de los costos de ligante, ya que el asfalto espumado comprende un asfalto de penetración estándar y sólo un pequeño porcentaje de agua, típicamente un 2% en masa del asfalto. En el asfalto espumado no se incurren en costos de fabricación distintos al de inversión inicial del equipo.
- Reducción de costos de transporte, para una misma proporción de asfalto residual una emulsión contiene 40% de agua la cual debe ser transportada con el asfalto.

- El material tratado con asfalto espumado puede ser colocado, compactado y abierto al tráfico inmediatamente.
- El material tratado con asfalto espumado se mantiene trabajable por extensos períodos de tiempo y puede ser acopiado en condiciones climáticas adversas sin que el asfalto sea lavado del agregado.
- El proceso de asfalto espumado puede ser usado para tratar materiales in-situ con contenidos de humedad de terreno relativamente altos, debido a que el ligante puede ser agregado sin usar agua adicional.

De forma similar a la estabilización con emulsión asfáltica, se debe agregar pequeñas proporciones de cemento o cal junto con el asfalto espumado. El objetivo es similar, mejorar la resistencia retenida en condiciones de humedad. El empleo de un filler activo ayuda además a la dispersión del asfalto al incrementar la fracción menor a 0,075 mm del material así como también mejorar la trabajabilidad de la mezcla y la reducción del Índice de Plasticidad.

3.2.2 Características del asfalto espumado

El asfalto espumado se caracteriza por dos propiedades principales:

- Razón de expansión, que es una medida de la viscosidad de la espuma y va a determinar qué tan bien se va a dispersar el asfalto en la mezcla. Se calcula como la razón entre el máximo volumen de la espuma relativo a su volumen original.

- Vida media, medida de estabilidad de la espuma y provee una indicación de la tasa de colapso de la espuma. Se calcula como el tiempo, en segundos, que transcurre para que la espuma colapse a la mitad de su volumen máximo.

En la figura N°10, se representa gráficamente las características de razón de expansión y vida media del asfalto espumado.

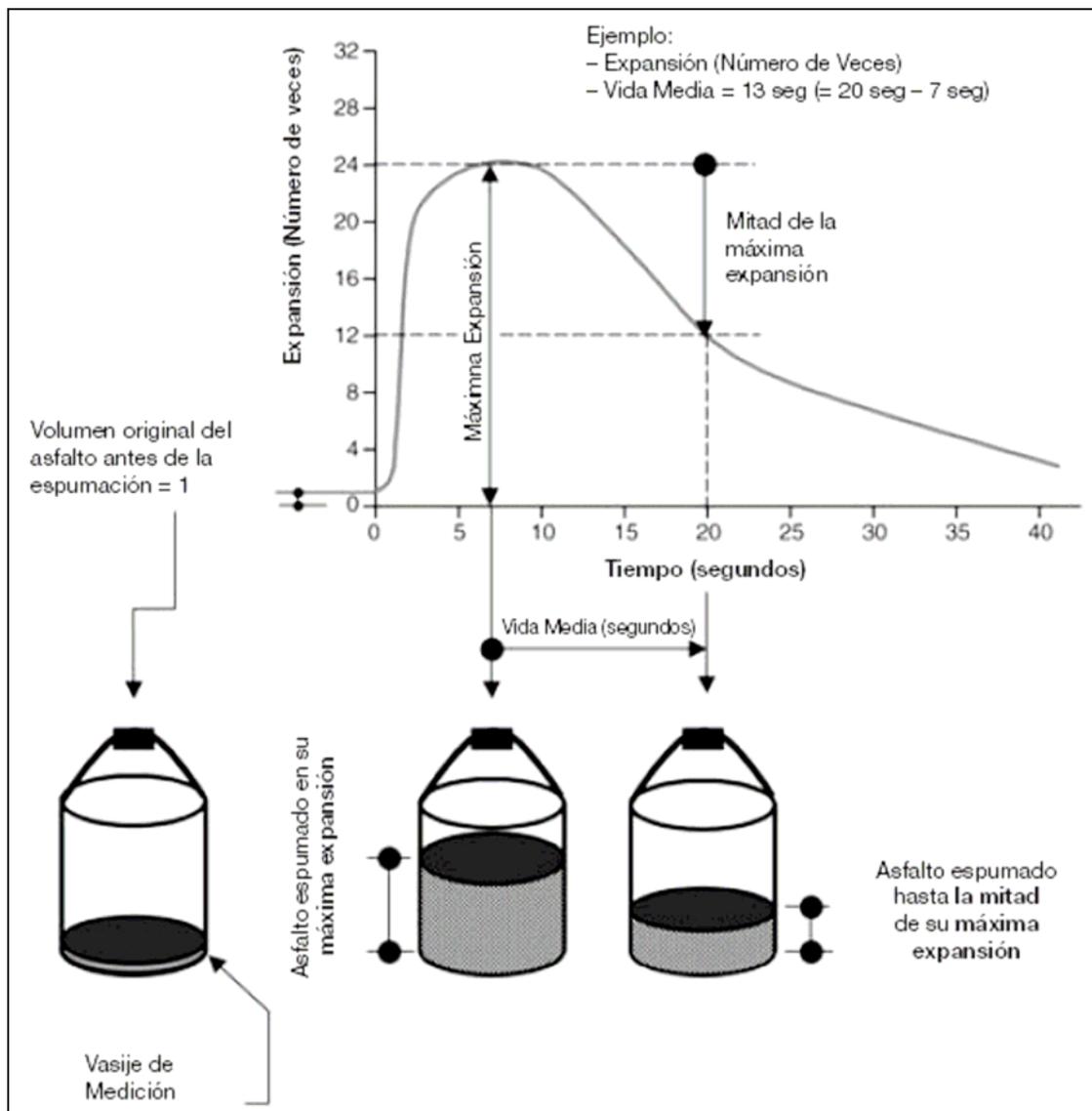


Figura N°10, Características del asfalto espumado.

3.2.2.1 Factores que influyen a las propiedades de la espuma.

Se considera que la “mejor” espuma es la que optimiza tanto la expansión como la vida media.

La razón de expansión y la vida-media del asfalto espumado está afectado por:

- Adición de agua: aumentar la cantidad de agua inyectada al asfalto aumenta efectivamente el volumen de espuma producido por un factor multiplicador de 1500. Así, aumentar la cantidad de agua añadida aumenta el tamaño de las burbujas creadas, causando que aumente la tasa de expansión. Sin embargo, el aumentar el tamaño individual de las burbujas reduce el espesor de la película del asfalto que las rodea, haciéndolas menos estables y resultando en una reducción de la vida media. Por ello, la razón de expansión y la vida media están relacionadas de forma inversa a la cantidad de agua que es añadida, como se muestra en el Grafico N°1.

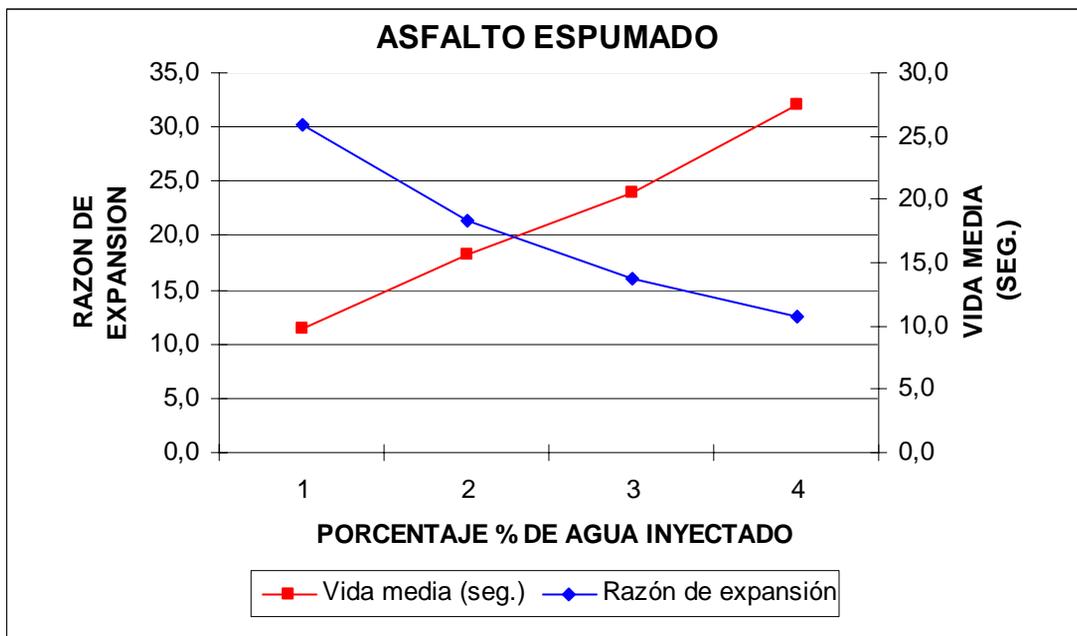


Grafico N°1, Variables que actúan en la calidad del espumado.

- Tipo de asfalto: generalmente se utilizan asfaltos con valores de penetración entre 60 y 200 para espumar, pese a que asfaltos más rígidos que cumplen con los requisitos mínimos de espumado se han utilizados en el pasado. Por razones prácticas, los asfaltos más rígidos son generalmente evitados ya que producen una espuma de peor calidad, generando una dispersión más pobre.

- Temperatura de Asfalto: la viscosidad del asfalto goza de una relación inversa con la temperatura, a medida que la temperatura aumenta, la viscosidad se reduce. Lógicamente, mientras más baja es la viscosidad, mayor es el tamaño de la burbuja que se formará cuando el agua cambie de estado en el proceso de espumado. Debido a que este proceso saca energía del asfalto, la temperatura antes del espumar debe exceder los 160°C para obtener un producto satisfactorio.

- Presión de asfalto y de agua: el asfalto y el agua son inyectados en la cámara de expansión a través de pequeñas aberturas. El aumentar la presión en las tuberías de suministro causa que el flujo que pasa a través de estas aberturas se disperse. Mientras más pequeñas son las partículas individuales, mayor es el área de contacto disponible, mejorando así la uniformidad de la espuma.

- Aditivos: existen muchos productos en el mercado que van a afectar las propiedades espumantes del asfalto, tanto negativa (agentes antiespumantes) como positivamente (espumantes). Usualmente, los espumantes son sólo requeridos cuando el asfalto ha sido tratado con un agente antiespumante (normalmente durante el proceso de refinado). La

mayoría de los espumantes son añadidos al asfalto antes de calentar a las temperaturas de aplicación y tienden a ser sensibles a la temperatura, siendo su vida efectiva bastante corta. Para obtener los beneficios de añadir un espumante, el asfalto debe ser utilizado dentro pocas horas.

3.2.2.2 Características aceptables de espumado.

Todos los asfaltos que se pretenden usar para espumar deben ser ensayados en el laboratorio para determinar sus propiedades espumantes. El objetivo de este ejercicio es encontrar la combinación de temperatura de asfalto y adición de agua a la que se consigue un espumado óptimo, es decir la mayor razón de expansión y vida media.

Durante su investigación en asfalto espumado a fines de los 90, el profesor Kim Jenkins desarrolló el concepto de "Índice de Espumación" para medir la combinación de razón de expansión y vida media. Definió el Índice de Espumación como el área bajo la curva obtenida de graficar la razón de expansión v/s la vida media, concluyendo que a mejores propiedades de espumado, mejor el Índice de Espumación y mejor el producto estabilizado alcanzado. Su investigación comparó el efecto del Índice de Espumación con la temperatura del material al tiempo de mezclado, concluyendo que a medida que la temperatura aumenta, un menor Índice de Espumación puede ser usado para alcanzar una estabilización efectiva.

3.2.2.3 Dispersión del asfalto espumado.

A diferencia de las mezclas asfálticas en caliente, el material estabilizado con asfalto espumado no se ve negro. Esto se debe a que las partículas más gruesas del agregado no se cubren con asfalto. Cuando el asfalto espumado entra en contacto

con el agregado, las burbujas de asfalto revientan en millones de pequeñas gotitas de asfalto que se adhieren a las partículas finas, específicamente la fracción menor a 0,075 mm. Las gotitas de asfalto pueden intercambiar calor sólo con la fracción de filler y todavía tener viscosidad suficientemente baja como para cubrir las partículas. La mezcla espumada resulta en un filler ligado con asfalto que actúa como mortero entre las partículas gruesas. Por ende, hay un ligero oscurecimiento del color del material después del tratamiento.

La adición de cemento, cal o algún material fino similar (100% que pasa el tamiz de 0,075 mm) ayuda a dispersar el asfalto, particularmente donde el material reciclado es deficiente en finos (por ejemplo, menos del 5% pasando el tamiz 0,075 mm).

3.2.3 Material adecuado para tratamiento con asfalto espumado.

La tecnología de asfalto espumado es aplicable en la estabilización de una gran variedad de materiales, que van desde arenas, gravas, hasta piedra chancada y pavimento asfáltico recuperado. Tanto granulares seleccionados como marginales, vírgenes o reciclados, han sido utilizados en forma satisfactoria en el proceso de reciclado. Sin embargo, es importante establecer los límites de tolerancia requerida en los agregados, así como identificar la composición óptima del material que va a ser sometido al tratamiento con asfalto espumado. Materiales que son pobres en finos no se mezclan en forma adecuada con el asfalto espumado. Como se señala en la Grafico N°2, el porcentaje mínimo de finos requerido es del 5%, considerando como finos la fracción del material que pasa la malla de 0,075 mm (N° 200).

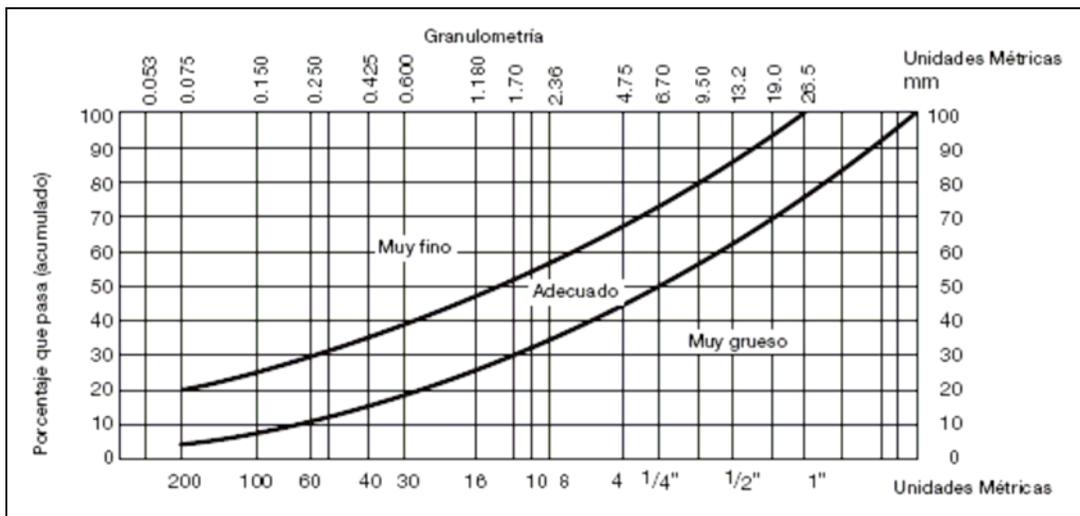


Grafico N°2, Banda granulométrica recomendada para uso de asfalto espumado.

Cuando un material no tiene la cantidad adecuada de finos, el asfalto espumado no se dispersa en forma apropiada y tiende a formar lo que se conoce en el material reciclado como “filamentos” de asfalto (aglomeraciones de material fino con asfalto), los que varían en tamaño dependiendo de la escasez de finos. Un porcentaje de finos muy bajo producirá largos filamentos, los que en la mezcla actuarán como lubricante y producirán una disminución en la resistencia y estabilidad del material.

Ensayos granulométricos simples, que se realizan a partir de muestras extraídas del pavimento existente indican si existe una eventual deficiencia en el contenido de finos. Sin embargo, esta deficiencia puede ser corregida mediante la importación de material adecuado, con un alto contenido de finos. Este material se esparce sobre la superficie del pavimento en forma previa a la aplicación del reciclado. No obstante, los materiales cohesivos deben ser tratados con cuidado. Si bien los ensayos de laboratorio de estos materiales pueden arrojar un alto porcentaje de finos que pasan la malla de 0,075 mm de diámetro, generalmente la calidad del mezclado conseguida en terreno es deficiente. Este fenómeno se debe a la naturaleza plástica del material, la que produce que la fracción fina se aglomere, haciendo difícil la dispersión del asfalto en forma de espuma a través del agregado. Comparaciones

entre ensayos granulométricos lavados y no lavados realizados en laboratorio, entregan una indicación sobre la relevancia del problema. La granulometría no lavada indica la calidad de los finos disponibles.

El material que es deficiente en finos puede ser mejorado mediante la adición de cemento, cal u otro material que pase en un 100% la malla No 200. Sin embargo, debe evitarse una dosificación de cemento superior al 1,5%. Un porcentaje mayor de cemento tiene un efecto negativo, producto de la pérdida de flexibilidad en la capa estabilizada.

Las bandas granulométricas presentadas en la Grafico N°2 tienen un amplio rango de tolerancia y pueden ser ajustadas con el objetivo de obtener una granulometría que entregue la cantidad mínima de vacíos en el agregado mineral. Si se logra producir mezclas con un bajo contenido de vacíos, se obtiene un material estabilizado con asfalto espumado con excelentes propiedades.

3.2.4 Muestras de material utilizadas para el diseño de mezclas.

El método utilizado en la toma de muestras del material que va a ser estabilizado con asfalto espumado es muy importante. Un control inadecuado o deficiente en la toma de muestra se traduce en ensayos no representativos que entregarán resultados erróneos, lo que puede traer serias consecuencias. Por lo tanto, debe tenerse conocimiento de tres factores importantes para la toma de muestras de dosificación:

- Profundidad del reciclado, y las proporciones de cada capa in-situ que será mezclada y conformará la capa compuesta.
- Variabilidad del material en la longitud y profundidad del pavimento existente. Esto significa que deben realizarse suficientes diseños de

mezclas como para considerar esta variación. En los casos donde la variabilidad es significativa, el material de cada capa debería ser separado en sus fracciones correspondientes, y luego ser mezclado en las proporciones requeridas. De esta forma, puede obtenerse una mezcla óptima y luego estudiar la influencia de la granulometría en la variabilidad de la mezcla tratada con asfalto espumado.

- Preparación del material del pavimento existente para la mezcla. La utilización de una máquina de fresado pequeña para el muestreo del material asfáltico es el procedimiento más adecuado para obtener muestras representativas.

3.2.5 Propiedades típicas de materiales estabilizados con asfalto espumado.

A continuación se describen las propiedades más importantes aplicables al material estabilizado con asfalto espumado. Estas propiedades se obtienen cuando la aplicación del asfalto espumado es óptima. Los rangos de aplicación del asfalto espumado sugeridos son útiles para definir un contenido asfáltico aproximado en el diseño de mezclas. Estos rangos de aplicación generalmente son aplicables cuando se utiliza un 1% de filler activo (cal o cemento) en la mezcla.

Contenido de asfalto espumado típico relativo a granulometría del agregado		
Porcentaje que pasa la malla: %		Porcentaje de asfalto espumado (% en peso sobre el agregado seco)
4,75 mm	0,075 mm	
< 50	3.0 - 5.0	2.0 - 2.5
	5.0 - 7.5	2.0 - 3.0
	7.5 - 10.0	2.5 - 3.5
	> 10.0	3.0 - 4.0
> 50	3.0 - 5.0	2.0 - 3.0
	5.0 - 7.5	2.5 - 3.5
	7.5 - 10.0	3.0 - 4.0
	> 10.0	3.5 - 4.5

Tabla N°2, Contenido de asfalto según granulometría.

Los contenidos de asfalto espumado presentados en la tabla N°2 son sólo indicadores aproximados.

El contenido óptimo de asfalto está definido por muchos otros factores además de la granulometría del agregado, y por lo tanto es imperativo que un diseño de mezclas sea efectuado para determinar el contenido óptimo de cada material, también debería tomarse en cuenta que no es un requisito aplicar siempre el contenido óptimo de asfalto cuando se estabiliza con asfalto espumado. Dependiendo de la aproximación del diseño, un rango de contenido asfáltico bajo el óptimo puede ser suficiente para conseguir las propiedades requeridas. Este rango de aplicación se denomina “contenido mínimo de asfalto”.

3.2.5.1 Resistencia.

Para evaluar la resistencia de los materiales estabilizados con asfalto se utiliza la resistencia a la tracción indirecta (ITS). La Tabla N°3 muestra los valores que comúnmente se obtienen de estos ensayos.

El ensayo ITS puede ser realizado en probetas de 100 mm o 150 mm, confeccionadas y curadas siguiendo los procedimientos. Además, la susceptibilidad a la humedad del material es generalmente determinada en términos de la Resistencia a la Tracción Retenida (TSR), ensayando probetas de 100 mm mediante la siguiente ecuación:

$$TSR = \frac{ITS_{\text{saturado}}}{ITS_{\text{seco}}}$$

Ecuación N°2, Resistencia a la tracción indirecta.

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

Tipo de material	Probetas 100 mm Marshall		Probeta 150 mm Proctor
	ITS seco (Kpa)	TSR (Razón)	ITS seco (Kpa)
RAP/ piedra chancada (mezcla 50/50)	250 a 600	0.8 a 1.0	120 a 250
Piedra chancada graduada	200 a 500	0.6 a 0.9	120 a 200
Grava natural (IP<10, CBR<30)	150 a 450	0.3 a 0.75	80 a 150

Tabla N°3, valores típicos de ensayos.

Investigaciones recientes han introducido la Resistencia a la Compresión no Confinada como un indicador de la capacidad de soporte del material estabilizado (resistencia a la deformación permanente). Este es un valor importante, especialmente cuando se estabiliza material de baja calidad. Se propone un valor mínimo de resistencia a la compresión confinada de 700 kPa para una probeta de 150 mm de diámetro, confeccionada con un esfuerzo de compactación del 100% del Proctor Modificado

3.2.5.2 Rigidez.

El Módulo Resiliente (MR) de un material estabilizado con asfalto puede ser medido en laboratorio si se somete un espécimen a un ensayo de carga repetitiva. El ensayo de probetas Marshall de 100 mm de diámetro (curadas y secas) a tracción indirecta a 10 Hz y 25°C, entrega los valores presentados en la Tabla N°4.

TIPO DE MATERIAL	MR (Mpa)
RAP/ piedra chancada (mezcla 50/50)	2500 a 4000
Piedra granular chancada	2000 a 3000
Grava natural (IP<10, CBR<30)	1500 a 3000

Tabla N°4, Valores de modulo resiliente.

CAPÍTULO IV: DISEÑO DE MEZCLAS DE AGREGADOS CON CEMENTO ASFÁLTICO ESPUMADO

4.1 Generalidades.

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

4.2 Aparatos.

Para poder llevar a cabo dichos procedimientos mencionado anteriormente se requiere de una serie de aparatos de laboratorio que se detallaran a continuación.

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

mezcla de un mezclador de laboratorio accionado por electricidad, con una capacidad de cuando menos 10 kg.

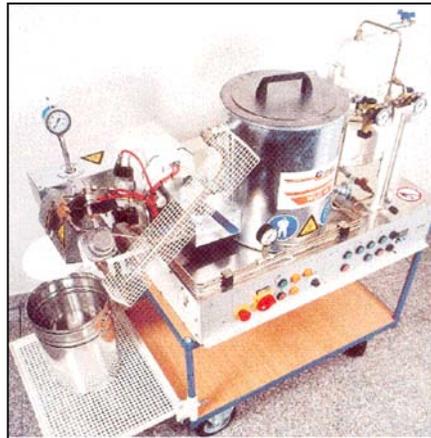


Figura N°11, planta portátil de laboratorio.

- Moldes de compactación Marshall de 101.6 ± 0.5 mm de diámetro y 87.3 ± 1 mm de altura, con placa de base y collar de extensión. La placa de base y el collar de extensión deberán ser intercambiables, es decir, ajustables en cualquiera de los dos extremos del molde.
- Extractor de probetas. Elemento de acero en forma de disco, con diámetro de 100 mm y 12.7 mm de espesor, utilizado para extraer la probeta compactada del molde, con ayuda del collar de extensión.
- Martillo de compactación. Consiste en un dispositivo de acero formado por una base plana circular de 98.5 ± 0.5 mm diámetro y un pisón deslizante de 4536 ± 5 gramos, con una caída libre de 457 ± 3 mm. El martillo de compactación debe estar equipado con un protector de dedos.
- Pedestal de compactación. Consisten en una pieza prismática de madera, de base cuadrada de 203 mm de lado y 457 mm de altura, provista en su cara superior de una platina cuadrada de acero de 305 mm de lado y 25.4 mm de espesor, firmemente sujeta a la misma. La madera será roble u otra clase cuya densidad seca sea de 670 a 770 kg/m³. El conjunto debe fijarse

firmemente a una base de concreto debiendo quedar la platina de acero en posición completamente horizontal.

- Soporte para molde. Dispositivo con resorte de tensión, diseñado para centrar rígidamente el molde de compactación sobre el pedestal. Deberá, además, mantener el molde en su posición durante el proceso de compactación de la mezcla.
- Balanza de 5 kg de capacidad, con precisión de 1 gramo.
- Espátula con una cuchilla de aproximadamente 150 mm de longitud.
- Prensa con capacidad mínima de carga de 20 kN con una velocidad uniforme de desplazamiento de 50.8 mm por minuto, provista de un medidor de carga de cuando menos 15 kN con una precisión de 0.1 kN.
- Recinto termostático capaz de mantener una temperatura e $25 \pm 1^\circ \text{C}$.
- Dos bandas de apoyo, de acero endurecido, de 13 ± 0.1 mm de ancho y 70 mm de longitud, con una superficie cóncava con radio de curvatura de 51 ± 1 mm. Las bandas de apoyo deben montarse en un marco de diseño apropiado, que permita su correcta alineación sobre los especímenes de prueba.
- Placa de transferencia de carga, circular o cuadrada, que permita transferir la carga de la máquina de compresión a las bandas de apoyo sin deformación. Sus dimensiones deben ser tales, que cubran al menos la longitud de la probeta.
- Calibradores para medir la longitud y el diámetro de las probetas, con aproximación a los 0.5 mm más cercanos.
- Desecador de vacío u otro recipiente apropiado y una bomba de vacío capaz de reducir la presión a menos de 50 mm de mercurio, conectada a un manómetro.
- Termómetro con un rango de 0 a 50°C .

4.3 Optimización de las propiedades del asfalto.

El objetivo es determinar el porcentaje de agua que optimiza las propiedades de espumado de un determinado asfalto, maximizando la relación de expansión y la vida media del asfalto espumado. Para ello, se calibran las ratas de flujo de asfalto y agua. La primera se regula a razón de 100 gramos por segundo. La presión de aire se ajusta a 100 kPa. Se mantiene el asfalto a una temperatura entre 180 y 200°C durante 15 minutos, antes de comenzar la producción de espuma. Se requieren cinco muestras de asfalto espumado para producir espuma con contenidos de agua entre 1% y 3%, en incrementos de 0.5%.

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

4.4 Preparación de los agregados pétreos.

Se deben realizar los siguientes pasos en este ítem:

- Se determina la granulometría y la plasticidad de los agregados pétreos. En algunos casos, la mezcla de dos o más agregados puede ser necesaria

para satisfacer el requisito granulométrico de la especificación. Se debe realizar un pretratamiento con cal, si el producto plástico (IP * %pasa tamiz de 75 mm) es mayor de 72.

- Se realiza un ensayo modificado de compactación, para obtener el contenido óptimo de humedad del agregado.
- Se seca la muestra de agregado a masa constante a 105°C. En el caso de materiales recuperados de un pavimento existente, el secado se debe realizar a la menor temperatura que prevenga a las partículas de adherirse unas a otras. El contenido de ligante de los materiales bituminosos recuperados debe ser determinado en este momento. Una vez seca, la muestra debe ser cuarteada y dividida en porciones de 10 kg cada una.

4.5 Tratamiento de los agregados con asfalto espumado.

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

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

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

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

4.6 Contenido de Humedad y Asfalto.

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

4.7 Compactación de las muestras de asfalto espumado.

Para realizar esta compactación se debe:

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

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

4.8 Curado.

Terminada la compactación, se remueve el molde de la placa de base y se permite el curado de la probeta compactada durante 24 horas dentro de él a temperatura ambiente. Luego se extrae la probeta compactada del molde con ayuda de un gato de extrusión u otro dispositivo adecuado.

4.9 Determinación del peso específico aparente de las probetas compactadas.

Se determina el peso específico aparente de cada probeta luego de su enfriamiento a temperatura ambiente. Se deben excluir de los ensayos posteriores aquellas probetas cuyo peso específico difiera en más de 30 kg/m³ del peso específico promedio del grupo al cual pertenecen.

4.10 Determinación de la Resistencia a la Tracción Indirecta.

La prueba de resistencia a la tensión indirecta se usa para ensayar probetas de mezclas con asfalto espumado compactadas y curadas bajo condiciones seca y húmeda. La resistencia a la tensión indirecta se determina midiendo la carga última de falla de una probeta sometida a una carga de deformación constante de 50.8 mm/minuto sobre su eje diametral, donde la falla debe provocarse en el eje axial de la probeta. Para ello se debe seguir lo siguiente:

- Fabricar 6 probetas de 4" de diámetro con equipo Marshall aplicando 75 golpes por cara.
- Las probetas se desmoldaran después de 24 horas fabricadas.
- Se colocaran las probetas sobre una bandeja plana y lisa y se curaran en un horno de aire forzado por 72 horas a 40°C.
- Las probetas serán removidas del horno después de las 72 horas y se dejaran enfriar a temperatura ambiente.
- Después de enfriar las probetas a temperatura ambiente se determinara la densidad de cada probeta mediante medidas geométricas. Se debe excluir cualquier probeta cuya densidad defiera en +/- 50 kg/m³.
- Luego tres probetas serán ensayadas a tracción indirecta (ITS) en condición seca y tres en condición saturada.
- Para determinar el ITS en condición seca se deberá proceder como sigue:
 - o Ambientar la probeta en una cámara de aire a 25+/- 1°C por al menos 1 hora, pero no más de 2 horas antes del ensayo.
 - o Remover la probeta desde la cámara de aire y colocarla en el aparato de carga de forma tal que el pistón de carga quede paralelo y centrado sobre el plano vertical de la probeta.
 - o Colocar el plato de transferencia de carga en la superficie centradamente y bajar el pistón de carga del dispositivo de ensayo de compresión.
 - o Aplicar carga a la probeta a una velocidad de 50,8mm/min. hasta conseguir la máxima carga (falla en el eje axial de la probeta). Registrar esta carga P (en KN) con una precisión de 0,1 KN.

- Para determinar el ITS en condición saturada se deberá proceder como sigue:
 - o Saturar la probeta colocándola en un baño de agua a 25 +/- 1°C por 24 horas.
 - o Remover la probeta, secar la superficie de modo de llevarla a condición saturada superficialmente seca.
 - o Colocar la probeta en el aparato de carga de forma tal que el pistón de carga quede paralelo y centrado sobre el plano vertical de la probeta.
 - o Colocar el plato de transferencia de carga en la superficie centradamente y bajar el pistón de carga del dispositivo de ensayo de compresión.
 - o Aplicar carga a la probeta a una velocidad de 50,8mm/min. hasta conseguir la máxima carga (falla en el eje axial de la probeta). Registrar esta carga P (en KN) con una precisión de 0,1 KN.

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

$$ITS = \left[\frac{2 P}{\pi L D} \right] * 10000$$

Ecuación N°3, resistencia a la tensión indirecta.

Siendo:

ITS = resistencia a la tensión indirecta kPa.

P = máxima carga aplicada en kN.

L = altura de la probeta en cm.

D = diámetro de la probeta cm.

- El ITS seco será el promedio de los tres valores obtenidos a partir de probetas ensayadas en condición seca y el ITS saturado será el promedio de los tres valores obtenidos a partir de probetas ensayadas en condición saturada, aproximada a 1(KPa).

4.11 Determinación del contenido de Ligante de Diseño.

Para todas las muestras (tanto las ensayadas en seco como bajo saturación), se dibuja una gráfica que represente el contenido de ligante (abscisas) contra la resistencia a la tensión indirecta (ordenadas), en el mismo juego de ejes.

El contenido de ligante para el cual alcanzan la máxima resistencia a la tensión las probetas ensayadas bajo saturación es el contenido de ligante óptimo de la mezcla con asfalto espumado.

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

4.12 Cancha de Prueba.

Al inicio de las faenas de reciclado se deberá realizar una cancha de prueba, destinada a probar el buen funcionamiento de los equipos, la secuencia de trabajo y las diferentes alternativas de compactación. Esta misma cancha de prueba servirá para obtener material reciclado, con el cual se verificara la dosificación del laboratorio y permitirá analizar los ajustes y correcciones necesarias. El ITS seco y saturado obtenido en esta cancha de prueba será en definitiva el que se utilice para el control de la mezcla en terreno.

CAPÍTULO V: PROCEDIMIENTO DE TRABAJO CON ASFALTO ESPUMADO.

5.1 Equipos de trabajo.

El asfalto deberá ser incorporado mediante tanques móviles, los cuales deberán estar equipados con un termómetro que indique la temperatura de su contenido, una válvula de salida con un diámetro interior mínimo de 75mm capaz de evacuar el contenido del tanque y un dispositivo de medición del volumen del contenido del tanque, calibrado a intervalos de no más de 100 litros. Cada tanque deberá poseer un certificado de carga que contenga la identificación del tanque, el peso neto del producto, el nombre del proveedor, número de lote y fecha de elaboración, temperatura a la cual el producto fue cargado y fecha, hora y lugar de carga.

El proceso de reciclado en frío, en sitio, mediante la tecnología de asfalto espumado deberá ser ejecutado con una máquina fresadora, la cual deberá cumplir como mínimo con lo siguiente:

- Un sistema de control en base a un microprocesador, que regule la aplicación de la dosis de agua de premezclado, dosis de agua para el proceso de espumado y dosis de asfalto en función de la velocidad de avance y profundidad de corte.
- Un sistema apropiado para espumar asfalto en base a cámaras individuales de expansión. Este sistema deberá ser equipado con una boquilla de ensaye capaz de producir una muestra de asfalto espumado para evaluar sus propiedades.

- Un tambor pulverizador y mezclador que gire de manera ascendente en la dirección de avance y que posea herramientas de corte para la fragmentación del materia que se esta reciclando.
- Un sistema de calefacción eléctrica que permita licuar el asfalto contenido en el sistema de asfalto espumado con el objeto de evitar obstrucciones durante las interrupciones de la operación.

El equipo de compactación deberá estar constituido por rodillos lisos vibratorios de uno o dos tambores y neumáticos pesados. El rodillo liso vibratorio será de amplitud y frecuencia variable y deberá tener a lo menos un peso de 11 toneladas y el rodillo neumático tendrá un peso mínimo de 23 toneladas, todos ellos en perfectas condiciones mecánicas, en especia a lo que se refiere a la suavidad de los arranques, paradas e inversiones de marcha.

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

5.2 Proceso Constructivo.

5.2.1 Proceso de Estabilización

Si se requiere de aplicación de material granular, ésta deberá ser realizada esparciendo los áridos sobre la superficie de rodadura existente como una capa de espesor uniforme antes del fresado. El espesor de dicha capa será determinado en función de la cantidad de materia granular requerido en cada sector.

La aplicación del aditivo se efectuara por medio mecánico u otro que garantice que la cantidad será la definida en el diseño de la mezcla. La cantidad del aditivo a emplear será expresada como porcentaje del material a reciclar y será determinada en función de los diseños de mezclas realizados en laboratorio considerando la situación de terreno, para las condiciones prevalecientes al momento de construir.

Salvo indicación contraria en la dosificación, la cantidad de agua a adicionar al material reciclado, con o sin aporte de material de recebo, será de 75% de su contenido óptimo de comparación obtenida mediante el ensaye Proctor Modificado. El aporte de agua será controlado en terreno por un microprocesador instalado en la maquina recicladora.

El cemento asfáltico deberá ser incorporado en el proceso de mezclado mediante el bombeo desde tanques móviles ubicados de acuerdo al sentido de avance de la maquina recicladora. Los tanques deberán estar equipados con termómetros para asegurar que la temperatura del cemento asfáltico sea la especificada en el diseño de mezclas con asfalto espumado, permitiéndose una variación de +/- 5°C del rango óptimo obtenido en el diseño. Si el cemento asfáltico es sobrecalentado por el rango especificado, éste no podrá ser utilizado.

Al inicio del proceso de reciclado de debela verificar las propiedades de espumación del asfalto obteniendo una muestra de espuma desde la boquilla de ensaye de la maquina recicladora. Durante el proceso de estabilización también se deberán verificar propiedades para lo cual se deberán tomar muestras durante el proceso de reciclado. La cantidad de asfalto a emplear será expresada como porcentaje del material en peso seco a reciclar y determinada en función de los diseños de mezclas

realizados en laboratorio, con las correcciones correspondientes para las condiciones granulométricas y de humedad, prevalecientes al momento de construir.

El control de la calidad del asfalto espumado empleado en el proceso de estabilización de cada sector, será realizado midiendo el contenido de asfalto residual en el tanque al finalizar cada jornada de trabajo, y de ese modo calcular el consumo real de asfalto, el cual se comparará con la demanda teórica prevista. El consumo de asfalto también puede ser obtenido desde el microprocesador de la máquina recicladora.

Cuando se conecte un nuevo tanque al equipo reciclador, se deberá revisar la temperatura del asfalto en el tanque, usando el termómetro calibrado. Al descargar las últimas toneladas de asfalto desde el tanque distribuidor, deberá evitarse el bloqueo del sistema de reciclado por la presencia de pequeñas partículas de carbón en el asfalto. Este problema deberá ser resuelto observando algún incremento inusual en la presión, lo que indicará que el filtro requiere limpieza.

Al finalizar cada jornada deberá limpiarse el equipo de trabajo, como tuberías, filtros, etc. Ya que el descuido de la maquinaria puede afectar la calidad del trabajo.

5.2.2 Compactación y Terminación.

Inmediatamente después de la colocación de la capa estabilizada esta debe ser compactada mediante el uso de rodillos neumáticos pesados y rodillos lisos vibratorios.

La compactación inicial se realiza con rodillos vibratorios lisos de uno o dos tambores, con vibración en el modo alta amplitud – baja frecuencia. Una vez

terminada la compactación inicial, la superficie se perfilara con motoniveladora o algún otro equipo similar para darle el perfil establecido en el proyecto.

Una vez obtenido el perfil, se procederá a la compactación secundaria, compactando la mezcla hasta que alcance una densidad mínima de 98% de la D.M.C.S (Densidad máxima compactada seca). Para este proceso se emplearan los rodillos vibratorios de uno o dos tambores con vibración a baja amplitud – alta frecuencia. Finalmente para darle terminación a la capa reciclada se deberá saturar la superficie con agua y luego compactar con rodillo neumático.

Si la humedad es excesiva, la mezcla tendera a deformarse. Por el contrario, si la humedad es escasa, no se podrá obtener la densidad deseada. Si la humedad de mezcla es muy elevada, se debe eliminar el exceso de agua suspendiendo la compactación, aireando y recompactando posteriormente.

El material tratado con asfalto espumado puede ser recompactado sin afectar su resistencia última, manteniendo el contenido de humedad aproximada al mismo nivel que se usó para la compactación primaria. En esta condición el material puede ser recompactado al día siguiente (usualmente por medio de un proceso previo de revoltura) y entonces terminado apropiadamente. Sin embargo, si ocurre un secado excesivo, la recompactacion afectara negativamente la resistencia ultima del material, en este caso se deberá someter el material a un proceso de revoltura con la adhesión de agua perdida, a través de la maquina fresadora o por regado mediante aspersión. Se debe tener presente que mientras mayor es el contenido de cemento en la dosificación, la recompactacion es más difícil de ejecutar y afecta la resistencia final del materia reciclado.

La superficie de la capa terminada deberá estar libre de laminaciones superficiales, sectores que exhiban segregación y corrugaciones o algún otro defecto que pueda afectar el comportamiento de la capa.

5.2.3 Limitaciones metereologicas.

Ningún trabajo de estabilización se podrá realizar cuando llueva o exista el riesgo de que las condiciones de lluvia se presenten durante la ejecución de los trabajos. Del mismo modo la estabilización no podrá comenzar si la temperatura ambiente se encuentra por debajo de los 5° C. La compactación y terminación, no podrán llevarse a cabo si la temperatura ambiental se encuentra por debajo de los 10° C durante las operaciones.

5.2.4 Control de Obra.

Para cada jornada de trabajo deberá tomarse de la parte posterior de la maquina recicladora la cantidad de muestra necesaria para fabricar seis probetas, de las cuales tres serán ensayadas a tracción indirecta seca y tres en condición saturada según condiciones de ensaye señaladas anteriormente.

En zonas con precipitaciones menores a 50mm por año, se debe cumplir con el 95% de la ITS (ensaye de tracción indirecta) seca obtenida en la cancha de prueba.

Para verificar el espesor de la capa, se obtendrá un conjunto de 8 mediciones en cada kilómetro reciclado, las cuales deberán cumplir las siguientes tolerancias:

$$- D_i \geq D_{\text{esp}} - (D_{\text{esp}} / 20)$$

Los espesores individuales deben ser superiores o iguales al espesor especificado menos la veinteava parte de éste).

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

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

El ancho de la capa reciclada nunca podrá ser menor al establecido en el proyecto, salvo restricciones en el perfil. La variación en la cota de cualquier punto de una sección transversal no puede superar los 15 mm.

El control de la compactación en terreno deberá ser realizado mediante el empleo de un densímetro nuclear y se exigirá una densidad mínima de 98% de la D.M.C.S. (densidad máxima compactada seca) obtenida con el materia de terreno obtenido una vez iniciado el proceso de reciclado.

5.2.5 Condiciones Medioambientales y de Seguridad.

Corresponderá cumplir con todas las Normativas Medioambientales, Higiene y de Seguridad vigentes en el País con tal de asegurar la ejecución segura de las partidas.

CAPÍTULO VI: EJEMPLO DE PROYECTOS DE RECICLADO DE PAVIMENTOS CON ASFALTO ESPUMADO.

6.1 Generalidades.

A continuación se muestran una serie de proyectos realizados a lo largo del mundo con la tecnología de reciclado en frío utilizando asfalto espumado, ya sea para producir una nueva base asfáltica o para estabilizar o sanear carreteras a bajo costo.

6.2 Proyectos.

6.2.1 Reposición ruta R-86 IX región de Chile.

En la novena región de nuestro país se lleva a cabo un proyecto en el cual se aplicó la nueva tecnología impulsada por el MOP, el asfalto espumado.

6.2.1.1 Datos del proyecto.

Sector	:	Los Sauces – Huequén. Provincia Malleco, región de la Araucanía.
Tramo	:	Km. 63,64 al Km. 92,50
Monto	:	9.480.672.066
Fecha Inicio	:	Febrero-08
Fecha Termino	:	Julio - 2010

6.2.1.2 Pavimento existente.

Las siguientes figuras muestran el estado en el cual se encontraba la ruta.

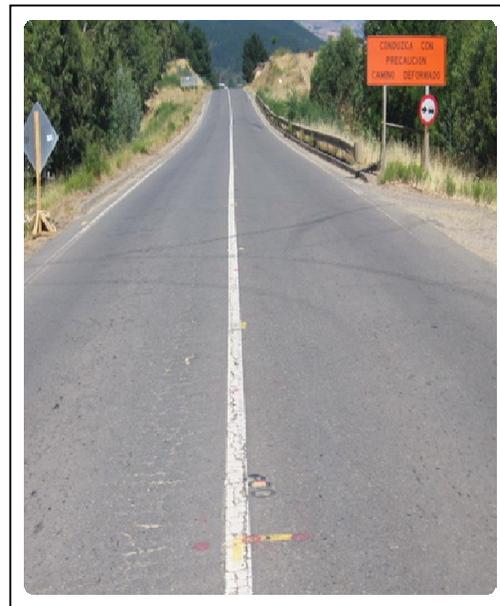
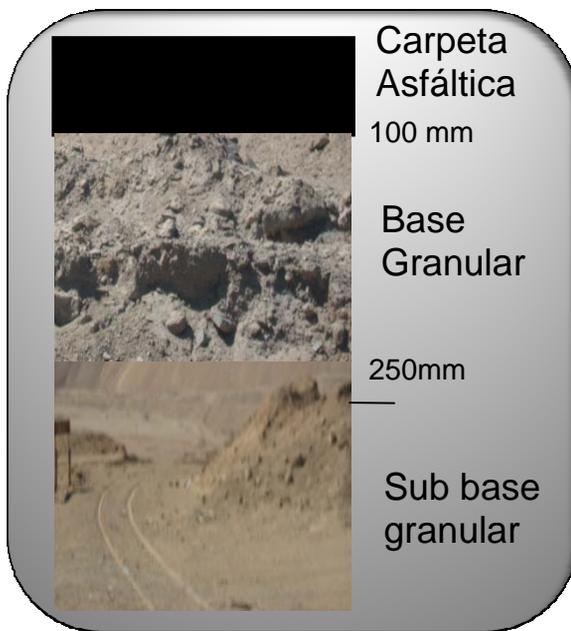


Figura N°12, Sección pavimento.

Figura N°13, vista de la ruta.



Figura N°14, Estado del pavimento.



Figura N°15, Pavimento flexible con notable figuración por fatiga.

6.2.1.3 Maquina recicladora.

La maquina recicladora utilizada en la reposición de la ruta R-86 es la recicladora modelo Writgen WR2200. En este proyecto se utilizo un ancho de trabajo de 4 metros, profundidad de fresado 0,21 metros y una velocidad de 0,11m/s.



Figura N°16, Recicladora WR2200.



Figura N°17, Rotor fresador.

6.2.1.3 Procedimiento de trabajo.



Figura N°18, Etapas del trabajo.

En la figura N°18, se muestra la utilización de un rodillo compactador 18ton alta frecuencia, la recicladora WR2200, el camión tanque de asfalto, el camión portador de agua y la aplicación manual de cemento.

Luego de reciclar el material creando una base reciclada con asfalto espumado se procede a la aplicación de una carpeta asfáltica de 50mm de espesor para entregar una superficie de rodadura a la ruta.

Para realizar este trabajo se ocupa la siguiente maquinaria, entre otras.



Figura N°19, Aplicación de carpeta asfáltica.



Figura N°20, Uso de rodillo neumático 12 ton.



Figura N°21, Uso de rodillo doble tambor.

6.2.1.4 Estado actual.

Las siguientes figuras muestran el estado actual en el cual se encuentra la ruta.

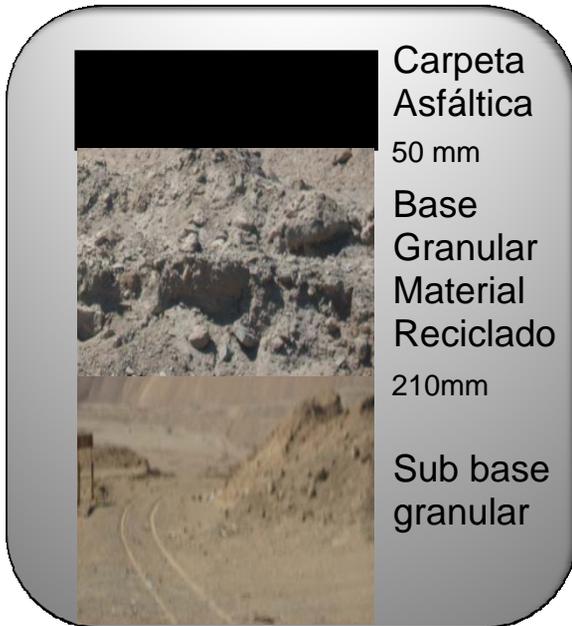


Figura N°22, Sección pavimento reciclado.



Figura N°23, vista actual de la ruta.

6.2.1.5 Rendimiento mezcla recicladora.

En el grafico se puede apreciar el rendimiento durante los días de trabajo, cabe señalar que posee un rendimiento constante de unos 600 metros de mezcla reciclada a diario. Es fundamental en este sentido tener una mantencion regular de la maquinaria en general.

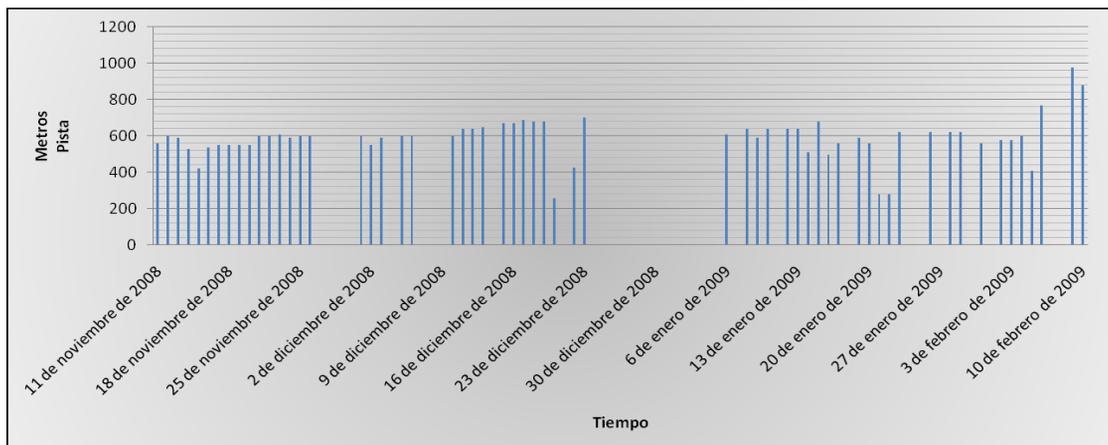


Figura N°24, Rendimiento mezcla recicladora.

6.2.1.6 Diseño mezcla recicladora.

A continuación se nombran los elementos utilizados para el diseño de la mezcla, estos son:

- Asfalto utilizado : CA24 de asfaltos chilenos.
- Cemento utilizado : Cemento hidráulico Pórtland.

Para la dosificación se empleo:

- Para la creación de la Espuma:
 - Temperatura : 165°C
 - Agua de inyección : 1,5 %
 - Contenido optimo de asfalto : 2,5 %
- Para la mezcla reciclada:
 - Contenido de cemento : 1,5 %
 - Agua de compactación : 2,8 %

Propiedades de la espuma:

- Razón de expansión : 11 veces
- Vida media : 11 segundos

Con estos datos se crean las probetas para ser ensayadas y verificar el buen comportamiento y funcionamiento que se quiere lograr mediante el reciclado con asfalto espumado, para así cumplir con las especificaciones técnicas de diseño del proyecto.

6.2.2 Carretera para alto tráfico en Arabia Saudita.

En un trayecto de más de 380 km. de longitud, la carretera de dos carriles une la ruta principal de Batha y el área Saudi Aramco Shaybah. A fin de poner en explotación un campo petrolífero, incluyendo una refinería y debido al tráfico de gran tonelaje a esperar en relación con el transporte de piezas de las plantas de procesamiento, con un peso que puede ascender hasta 200 toneladas, resultó imprescindible la construcción de una vía fiable de tráfico. Originalmente, la ruta había sido construida sólo como carretera no ligada de roca yesosa, por lo que fue posible sanearla en todo su largo en tan solo 180 días, empleando la tecnología de asfalto espumado.

Para ello, durante la etapa principal de construcción, se utilizaron 3 recicladoras en frío, así como mezcladoras de suspensión móviles. Añadiendo un 5% de asfalto espumado y un 2% de cemento como suspensión, fue posible fresar un promedio diario de aprox. 35.000 m² de carretera existente y procesarlo con los ligantes. La profundidad de trabajo fue de 20 cm. A fin de obtener propiedades óptimas de elaboración y compactación del subsuelo de roca yesosa, se añadió aproximadamente un 4% de agua. Además se emplearon motoniveladoras para corregir el perfil, así como también compactadores vibratorios y compactadores de neumáticos para compactar el aglomerado.

A fin de alcanzar un desarrollo óptimo del trabajo y de obtener la mejor calidad de ejecución posible, dos trenes de reciclaje, uno inmediatamente detrás del otro, trabajaron dedicados a la rehabilitación de uno de los dos carriles de la carretera. De esta manera fue posible garantizar la obtención de una buena adherencia de las vías de trabajo entre sí y la corrección óptima del perfil de la carretera completa. Así durante el tiempo completo de construcción, fue posible que los camiones de gran tonelaje transitaran por la obra móvil.

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

En un protocolo de inspección, los expertos en la construcción de carreteras elogiaron la excelente idoneidad del betún espumado como ligante, incluso bajo estas condiciones climáticas extremas, así como la elevada rentabilidad. Los métodos de construcción convencionales con mezclas en caliente, que se habían previsto originalmente, fueron rechazados, ya que con ellos no hubiese sido posible cumplir ni con las condiciones económicas, ni con el cronograma del proyecto.



Figura N°25, Tren de reciclado en funcionamiento.

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

Particularmente en algunas épocas de cosecha, circulan vehículos de elevada carga útil por estos caminos. Las vías, cuya infraestructura en un principio únicamente consistía de material barroso de excavación procedente del canal, presentaban un fuerte agrietamiento en la capa de rodadura de asfalto. Sucesivamente, la penetración de agua produjo daños mayores y erosión por lavaje.

Para poder rehabilitar el camino se aplicó y desarrolló un proyecto utilizando asfaltos espumados, para lo cual el primer paso fue granular el camino existente en el ancho completo de aprox. 4,3 m, antes de que una motoniveladora, así como una compactadora efectuaran una primera corrección del perfil y la precompactación de

la infraestructura homogeneizada. Durante el segundo paso, se llevó a cabo la incorporación de una combinación de ligantes compuesta de 1,5% de cemento y de un 3% de betún espumado, mediante un tren de pavimentación. Después de la compactación final de la red vial mediante compactadores vibratorios y compactadores de neumáticos, se aplicó un tratamiento de superficie para el sellado. También en este caso, el saneamiento de las vías resultó ser un método de rehabilitación rápido y eficaz, en el cual no fue necesario emplear material de otra procedencia.



Figura N°26, Tren reciclador de las vías.

6.2.4 Rehabilitación de una autopista en el Irán, bajo condiciones extremas.

Hace ya algunos años, en el Irán se había comenzado con la construcción de una autopista de seis vías, la Teheran-Qom Highway. Desafortunadamente, la rodadura de la carretera nunca fue terminada, por lo que, durante varios años, la capa de base permaneció abierta y sin protección. Con el tiempo, el clima predominante, así como el tráfico pesado produjeron graves daños en la capa de base. Por lo tanto, antes de la terminación de los trabajos de construcción, primeramente fue necesario llevar a cabo el saneamiento de la estructura completa de la carretera.

A fin de mantener el nivel de altura existente, la superficie de la carretera, en primer lugar, fue fresada a una profundidad de 10 cm. La capa restante, fue tratada hasta

una profundidad de 25 cm, con un tren de reciclaje, compuesto de la recicladora y la mezcladora de suspensión, añadiendo un 3,5% de betún espumado y 1,0% de cemento (como suspensión). De esta manera, fue rehabilitada rápida y económicamente una superficie de más de 800.000 m² de capa de base, en ambas direcciones.

Antes de que la sección saneada fuera abierta al tráfico, la capa de base fue cubierta con una capa ligante de 6 cm de espesor y una capa de asfalto de 6 cm.



Figura N°27, Reciclado en frío con asfalto espumado.

6.2.5 Reciclado con asfalto espumado en carretera de alto tráfico en Brasil.

Desde la introducción de la tecnología del reciclado en frío en el Brasil, la rehabilitación de la importante autopista Anhanguera ha sido uno de los mayores proyectos, en los cuales se empleó el betún espumado como ligante. La autopista, que une Sao Paulo con la ciudad Ribeirão Preto, es frecuentada diariamente por más de 15.000 vehículos, de los cuales un 60 % son “vehículos de gran tonelaje”.

La estructura existente estaba integrada por una capa de base de grava de 20 cm de espesor, así como por una capa ligante de asfalto y una capa de rodadura, ambas de 6 cm de espesor. En pocos meses, una superficie de aproximadamente 400.000

m² de carretera fueron rehabilitados añadiendo un 2,5% de asfalto espumado, así como 1,5% de cemento, se reciclaron capas de asfalto hasta una profundidad de trabajo de cerca de 12 cm. Los trabajos de fueron completados con una rodadura de asfalto de 6 cm de espesor, la cual se aplicó al final. En este caso se efectuó el reciclado “sin cortar el tráfico” a través de una obra móvil. De esta manera fue posible reducir el entorpecimiento del tráfico a un grado mínimo.



Figura N° 28, Los trabajos avanzan rápidamente, sin tener que cortar el tráfico.

6.2.6 Reciclado con asfalto espumado en proyecto de saneamiento en Noruega.

Temperaturas muy bajas en invierno y ciclos frecuentes de hielo y deshielo, exigen requerimientos especiales de las estructuras de carreteras en Noruega. Se requieren métodos económicos de rehabilitación, en especial para el saneamiento de vías de tráfico mediante el rentable reciclaje en frío, a fin de poder mantener la red de carreteras en un estado utilizable.

A fin de compensar fuertes desniveles y para estabilizar las capas existentes, es posible esparcir previamente material fresado o una mezcla nueva de minerales. La recicladora, al fresar la estructura de carretera existente, lo que por lo general se efectúa a una profundidad de cerca de 20 cm, va incorporando estos materiales.

Teniendo en cuenta la flexibilidad que requieren las estructuras de carretera debido a las bajas temperaturas durante el invierno, en el proceso de tratamiento se utilizan tipos de asfalto blando.

El sistema de regulación por microprocesador de la máquina recicladora controla el proceso de espumado y la dosificación de las cantidades añadidas de ligante.

Si se añade un promedio de 3,5% del peso del asfalto, el consumo de asfalto caliente al día asciende a 100 t, lo que corresponde a un rendimiento de la máquina de aproximadamente 10.000 m² por jornada, o bien a la rehabilitación en toda su anchura de un tramo de carretera de 1,5 km de longitud.

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



Figura N°29, Recicladora con rendimiento de 2.500 m² en poco menos de 2 horas.

ANEXO I: EQUIPO RECICLADOR

Dentro de los equipos utilizados para la rehabilitación de pavimentos mediante el reciclado, sin lugar a duda el de mayor importancia y quien realiza el mayor trabajo es la recicladora propiamente tal.

A continuación describiré un modelo en especial, el cual se ha utilizado en diversos proyectos alrededor de todo el mundo incluido nuestro país.

A1. Recicladora WR 2500 S



Figura A1.1, Recicladora wr2500s.

La recicladora WR 2500S es una de las más eficientes y rendidoras que existe en el mercado, posee características de estabilización, reciclado y pulverización. Algunas de sus principales características:

- Las anchuras de trabajo de 2,5 m o de 3,0 m y las profundidades de trabajo de 0 - 50 cm ofrecen un rendimiento del trabajo a un nivel continuamente elevado.
- La instalación de inyección dispone de unos microprocesadores que controlan la dosificación de agua, emulsión, suspensión de cemento y asfalto espumado en función de las respectivas exigencias.

- Gracias a la gran distancia del suelo (370 mm), a la tracción en todas las ruedas y al concepto de columnas de elevación, la WR 2500 S está perfectamente preparada para trabajar cualquier tipo de terreno.
- El rotor para fresar y mezclar permite realizar distintos trabajos a cuatro velocidades de corte diferentes, así como fresar en el sentido del avance y en el sentido opuesto al mismo, sin necesidad de reequipar la recicladora.
- Posee unos faros que le permiten trabajar en condiciones desfavorables de luminosidad.
- El amplio paquete de seguridad con tres interruptores de desconexión de emergencia permite, en todo momento, desconectar rápidamente la máquina desde distintos lugares.

A1.1 Sistemas de nivelación.



Figura A1.2, Sistema de nivelación recicladora.

Al objeto de conseguir resultados perfectos es posible dotar la WR 2500 S de diferentes sistemas de nivelación: sistemas de palpado mecánico, sensores de ultrasonido, palpadores de transductor de giro, sensores de inclinación. El sistema automático de nivelación consta de dos circuitos de regulación que operan independientemente uno del otro.

Todos los sistemas están unidos a la unidad de mando electrohidráulica para la profundidad por medio de conexiones de enchufe y se controlan mediante teclas. El

control digital indica los valores teóricos y los valores reales actuales preseleccionados para la profundidad de fresado.

A1.2 Tracción de la recicladora.



Figura A1.3, Tracción recicladora.

Debido a la tracción permanente en todas las ruedas y a las ruedas grandes y de fuerte adherencia, la WR 2500S es apta para cualquier terreno, esto también se debe a los neumáticos de alta presión, instalados en serie, con protector de flancos y tacos reforzados.

El avance se regula en función de la carga del motor diésel mediante un sistema de regulación automática de la potencia. Da igual si se trabaja en el modo de operación automático o manual, la conexión y la desconexión del bloqueo del diferencial ya no son necesarios.

Un potente sistema de frenado protege la máquina estacionada, garantizando el sistema de autorretención de la tracción hidrostática el efecto de frenado total.

El bloqueo de las cuatro ruedas mediante un freno automático de estacionamiento de discos múltiples accionado desde el puesto de mando confiere seguridad adicional.

A1.3 De dirección versátil y universal.

Las ruedas delanteras – vistas en dirección de marcha se guían por medio del volante suave, mientras que las ruedas traseras se hacen doblar a través de un joystick. El funcionamiento automático garantiza la marcha fiable en línea recta.

En un segundo modo de operación, el volante guía las ruedas traseras y el joystick, las delanteras. Las columnas de elevación delanteras o traseras hacen las veces de “eje de nivelación”. De esta forma, las ruedas que se desplazan en suelo plano sirven de referencia para la posición del rotor para fresar y mezclar.



Figura A1.4, Sistema de dirección.

A1.4 Accionamiento mecánico del tambor convierte fuerza en rendimiento.

La combinación de un potente accionamiento de traslación y de un fuerte accionamiento del tambor de fresado permite un grado máximo de eficacia. El tambor de fresado de accionamiento mecánico aprovecha la transmisión directa de la fuerza motriz de las robustas correas del motor al engranaje del rodillo.

Así es posible convertir la gran potencia del motor en rendimiento de fresado sin que se produzcan pérdidas por fricción causadas por desviaciones constructivas.

Además del elevado grado de eficacia hay otra ventaja decisiva: el mantenimiento sencillo.

A1.5 Rendimiento de fresado.

Ya sea que se trate de la estabilización, la pulverización o el reciclaje en frío – el rotor realiza todos los trabajos. El rotor para fresar y mezclar trabaja a cuatro velocidades distintas en operaciones de trabajo en sentido del avance o en sentido opuesto al avance, según las necesidades.

La gran masa tiene un efecto análogo a un volante de inercia y permite compensar las cargas por choques.

Los portapicazas están dispuestos óptimamente en almas elevadas de manera que existe espacio suficiente para mezclar el material en todas las profundidades de trabajo, lo que garantiza un funcionamiento suave, protege los elementos de accionamiento y prolonga considerablemente su vida útil.

A1.6 Calidad homogénea de mezcla.

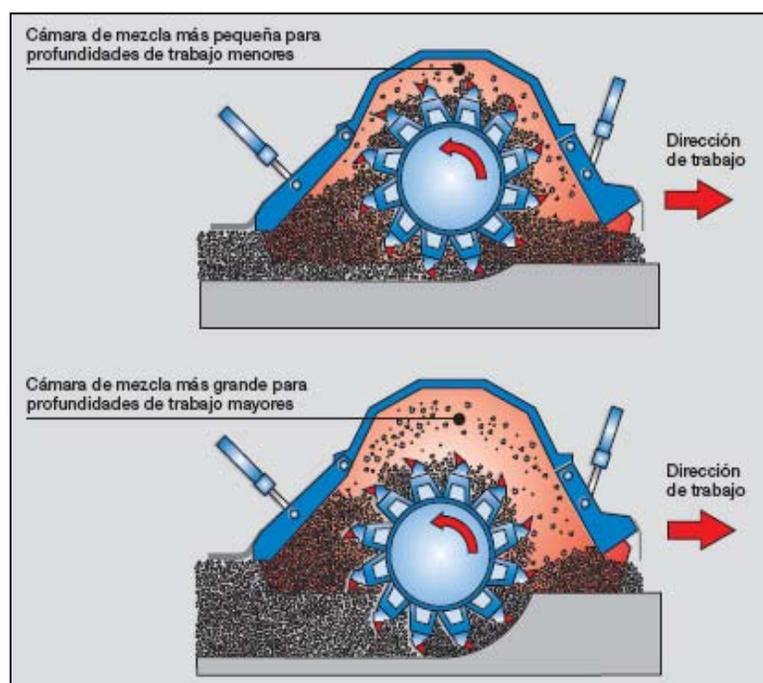


Figura A1.5, Calidad del fresado

La cámara de mezcla variable se adapta a la profundidad de trabajo. Este sistema permite alcanzar rendimiento elevado, mezcla de alta calidad y un desgaste reducido, incluso trabajando a profundidades máximas en suelos difíciles.

La caja del rotor para fresar y mezclar es particularmente resistente al desgaste y está reforzada adicionalmente.

Para seleccionar el grado de granulación se ajusta de forma variable la distancia entre la barra de impactos y el diámetro de corte. De esta forma es posible granular fiablemente incluso trozos grandes de asfalto desprendidos del firme.

A1.7 Un equipo eficiente: el conductor y el ordenador.



Figura A1.6, Unidad de mando.

La unidad de mando inteligente garantiza un grado óptimo de utilización del motor, un avance máximo y la estricta observancia de los datos de trabajo especificados por el operador de la máquina, tales como la profundidad de trabajo o la inclinación transversal.

Tres módulos de control, de diseño igual, controlan permanentemente el estado de los sensores. En el display se visualizan todos los datos de trabajo importantes, como, por ejemplo, la posición de las compuertas del tambor o el ángulo de giro

momentáneo de las ruedas. De esta forma, el conductor está bien informado en todo momento.

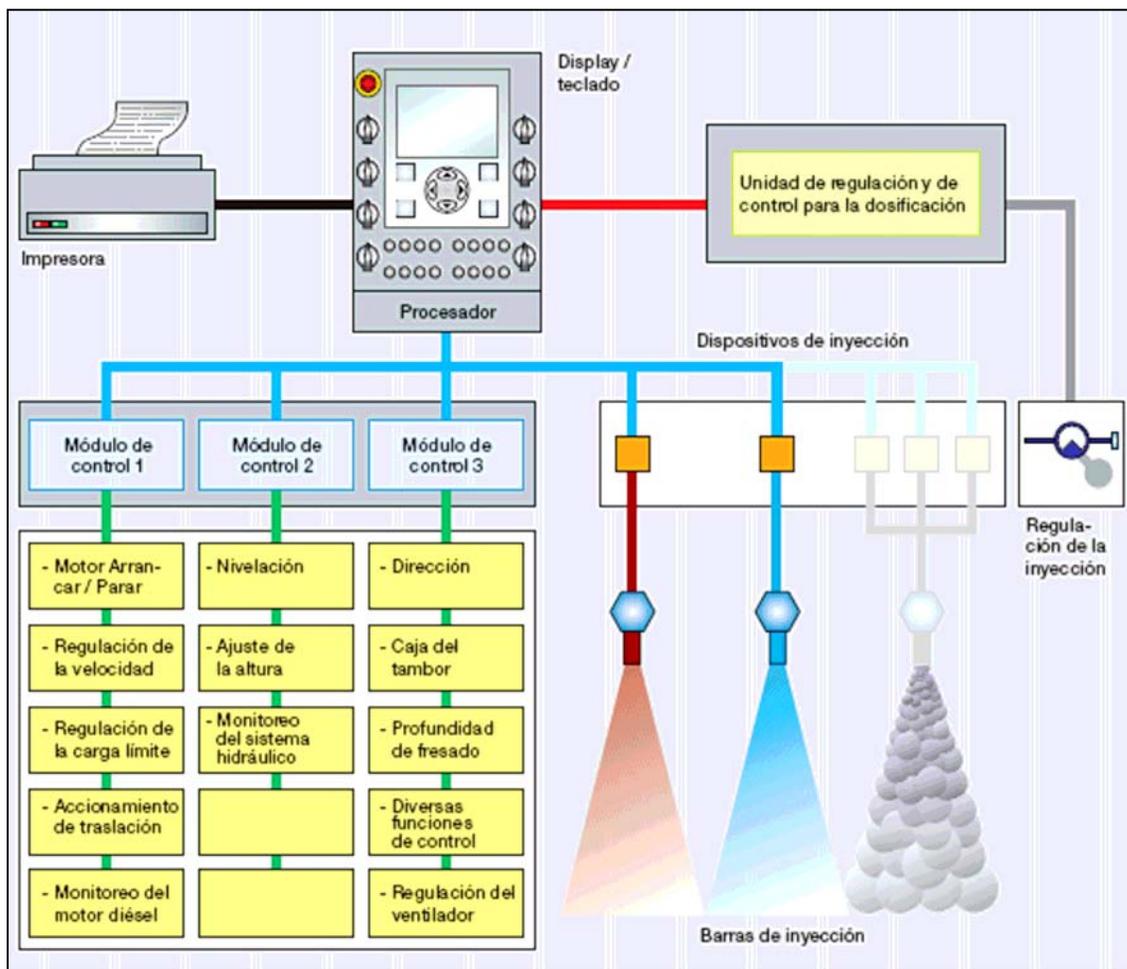


Figura A1.7, Ordenador de recicladora..

Concepto del sistema de control de la recicladora WR 2500 S: el ordenador de a bordo instalado en el puesto de mando procesa todos los datos transmitidos por los tres módulos de control y la unidad de control de la dosificación y permite visualizar el estado actual de la máquina en el display.

A1.8 Instalaciones de inyección.

La calidad de las capas estabilizadas o recicladas depende decisivamente de la observancia exacta de la dosis preseleccionada de aditivos como el agua, emulsión

de asfalto o asfalto espumado, así como del cumplimiento preciso de las anchuras de trabajo preseleccionadas.

Es posible montar varias instalaciones de inyección y agregar simultáneamente distintos aditivos en función del trabajo. Adicionalmente, se puede transportar a la cámara de mezcla una suspensión premezclada de cemento y agua, desde una instalación mezcladora de suspensión acoplada. Además:

- Unos microprocesadores controlan la cantidad de ligantes añadidos, considerando la velocidad de avance.
- Las bombas excéntricas transportan la emulsión de asfalto con mucho cuidado.
- Las bombas de engranajes dentados transportan el asfalto caliente a la barra de inyección.
- Las rampas de inyección con 16 toberas inyectan el líquido de manera uniforme en toda la anchura de trabajo.
- Es posible bloquear algunas toberas cuando las anchuras de trabajo son menores.

A1.9 La dosificación de emulsión.

Unos microprocesadores regulan la inyección simultánea de la emulsión de asfalto y de agua a través de una barra de inyección.

Las emulsiones de asfalto son ligantes de probada eficacia para el reciclaje en frío. Constan de asfalto (aprox. un 60%), agentes emulsionantes y agua (aprox. Un 40%). Se aportan en estado frío y se incorporan fríos a la mezcla granulada de materiales viales.

Después de eliminada el agua, la reacción del asfalto provoca que los materiales viales se adhieran transformándolos en una capa ligada. La observancia exacta de la cantidad de emulsión y el agua inyectada permite producir capas de base de alta calidad con un contenido de humedad óptimo para una compactación efectiva.

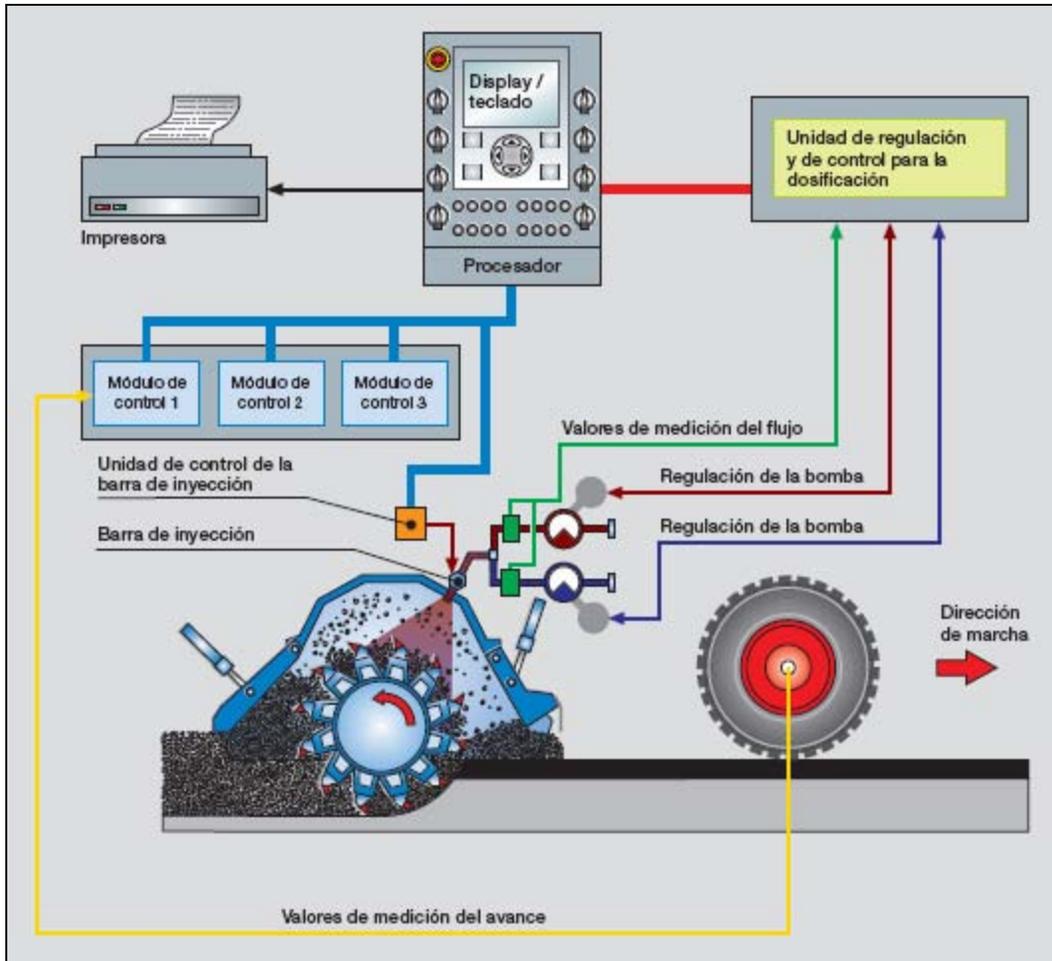


Figura A1.8, Dosificación de emulsión.

A1.10 El asfalto espumado requiere una tecnología de procesos perfeccionada.

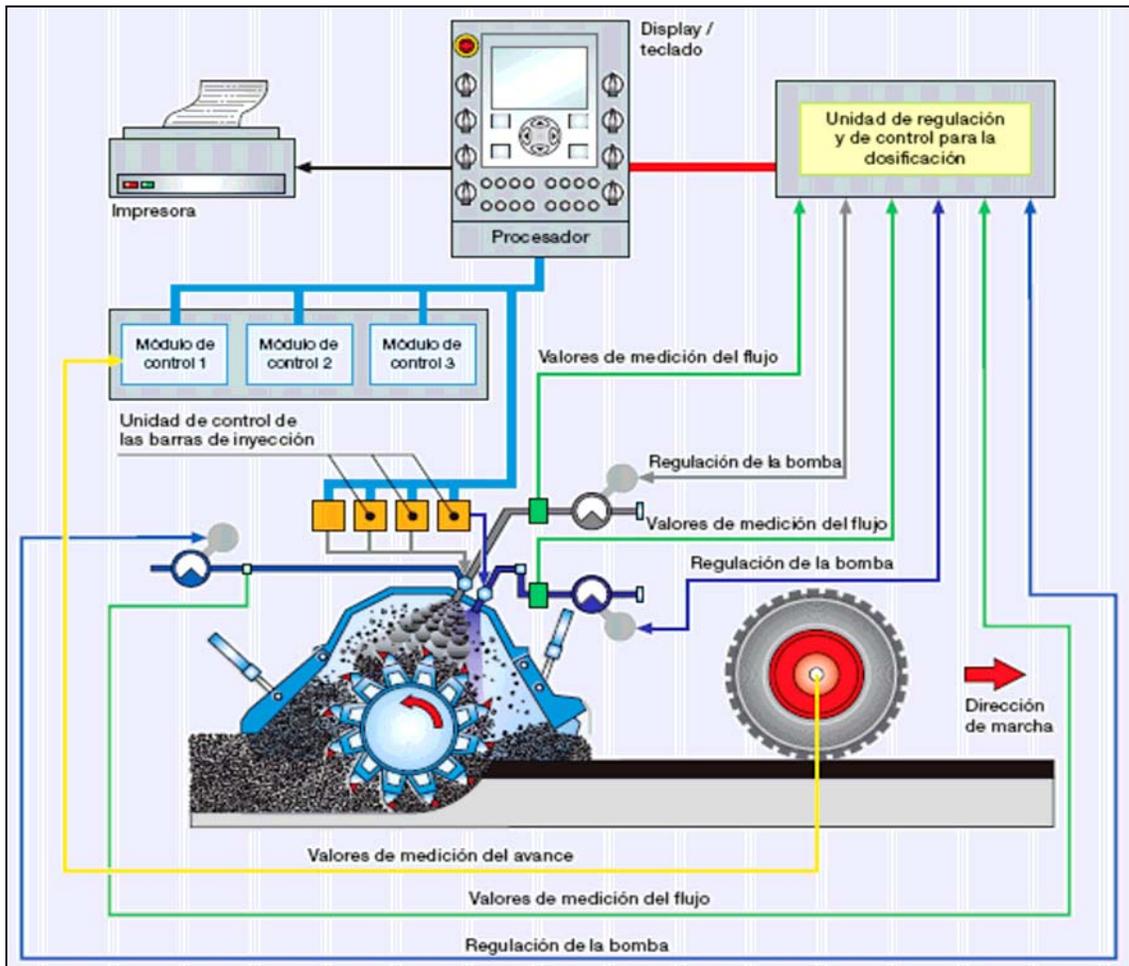


Figura A1.9, Dosificación de emulsión de asfalto espumado.

Unos microprocesadores regulan la inyección simultánea de asfalto espumado y de agua a través de dos barras de inyección.

Para producir asfalto espumado se inyecta una cantidad dosificada de agua fría en el asfalto calentado a una temperatura de unos 180 °C. Dentro de las cámaras de expansión de las toberas el asfalto se transforma en espuma, aumentando su volumen original a un tamaño aproximadamente veinte veces mayor.

Este proceso de transformación en espuma, que puede ser reforzado mediante la inyección de aire, reduce considerablemente la viscosidad del asfalto. La ventaja: es posible incorporar el asfalto espumado de gran volumen de forma particularmente uniforme en mezclas de materiales viales granulados.

A1.10.1 Instalación para producir y dispersar asfalto espumado.

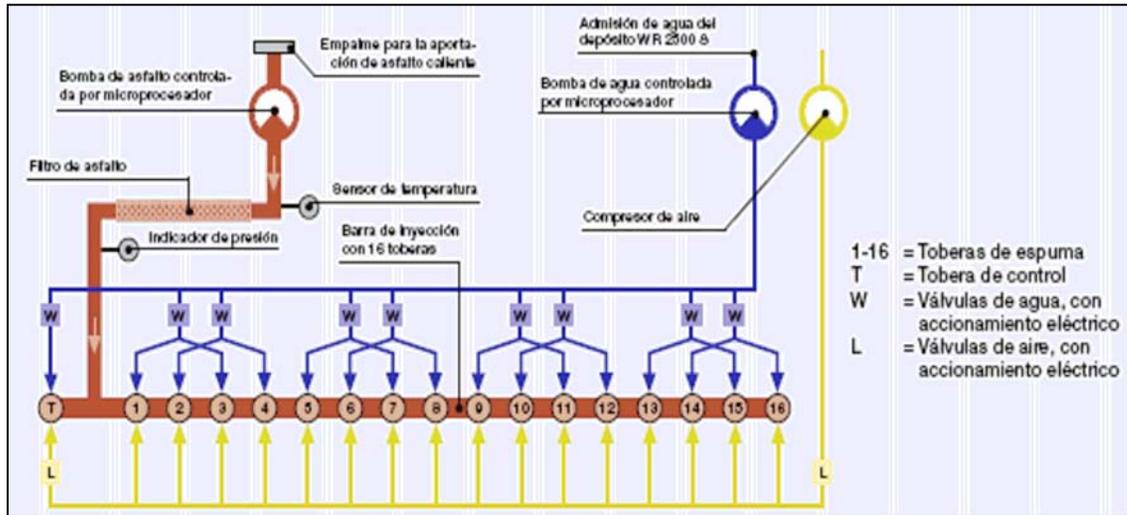


Figura A1.10, Diagrama de flujo de la instalación de asfalto espumado.

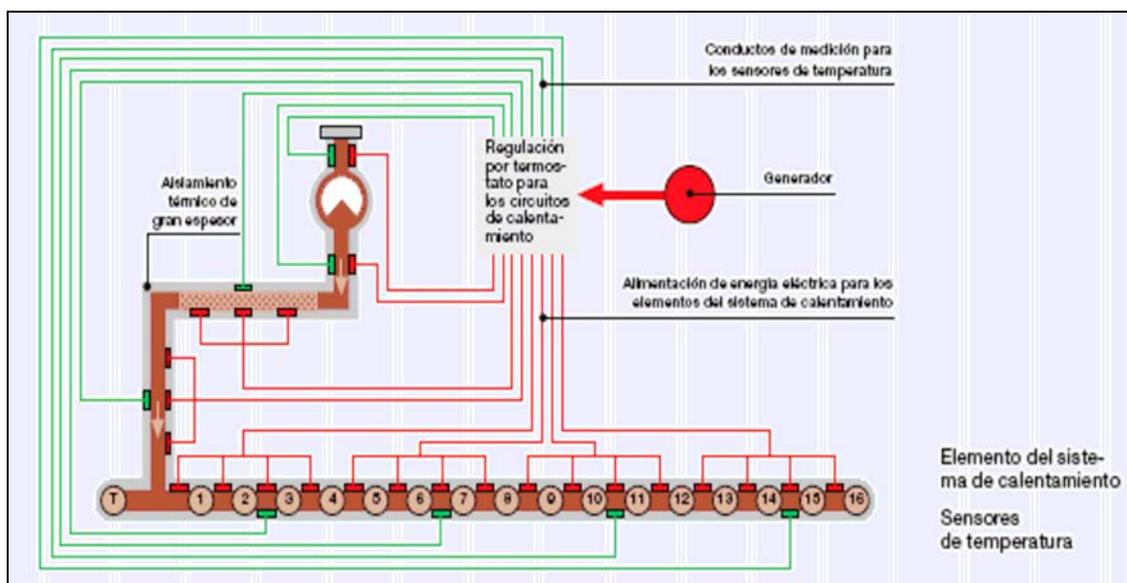


Figura A1.11, Calefacción eléctrica para la instalación de asfalto espumado.

Producción de asfalto espumado continua y controlada por microprocesadores:

- la instalación con calentamiento eléctrico y aislamiento térmico de gran espesor mantiene la temperatura óptima del asfalto para su transformación en espuma.

- El calentamiento regulado por termostato mantiene todos los componentes que transportan asfalto caliente a temperatura de servicio. Entre estos componentes se cuentan los conductos, las bombas, los filtros, los dispositivos de medición y las barras de inyección.
- La limpieza automática de las toberas garantiza un elevado grado de seguridad operacional.

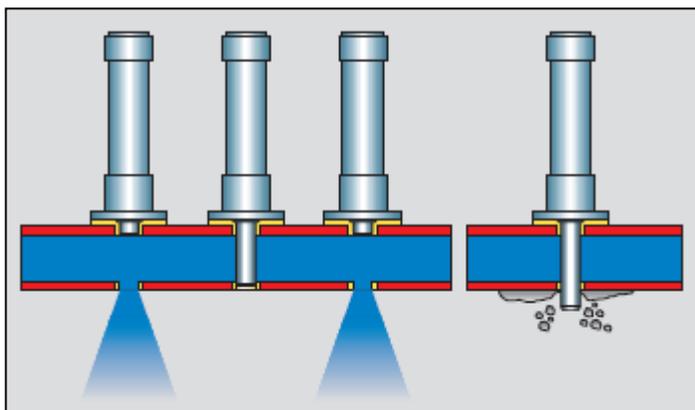


Figura A1.12, Limpieza de las toberas: de forma automática sincrónica y eliminación de incrustaciones en la cámara de mezcla: activada de forma manual.

- Permanentemente lista para el servicio: unas varillas de limpieza limpian automáticamente todas las toberas de las barras de inyección en los intervalos especificados.
- Una tobera de control permite verificar continuamente la calidad de la espuma durante el trabajo.

A1.11 Mantenimiento.

Todas las áreas de importancia para el mantenimiento son de fácil acceso, permitiendo controlar las presiones hidráulicas por medio de un manómetro de instalación fija. A fin de poder realizar un rápido control visual, los bloques de

válvulas con diodos luminiscentes se encuentran dispuestos en la plataforma del puesto de control de forma tal que se tenga fácil acceso a ellos.

En caso necesario, los técnicos de servicio revisan la unidad de mando y actualizan el software de mando mediante ordenador portátil, lo que permite utilizar rápidamente las optimizaciones de los programas para así conseguir un rendimiento de trabajo aún mayor.

Para mantener el motor limpio esta maquinaria posee:

- Un sistema innovador de conducción de aire mantiene limpio el compartimiento del motor: el aire se aspira en el puesto de mando y se expulsa en la parte posterior de la máquina. Unas chapas de fondo protegen desde la parte inferior.
- Unos filtros previos de ciclón adicionales, fáciles de recambiar, protegen el sistema de accionamiento de la mayoría de las impurezas
- El cableado bien realizado y los cables y componentes claramente marcados facilitan los trabajos de mantenimiento.

A1.12 Transporte y limpieza.

La facilidad de manejo y los detalles inteligentes, como, por ejemplo, la cabina abatible para un transporte sencillo, incrementan su eficiencia. El resultado: mejor calidad de trabajo, menos tiempo, gastos reducidos.

Para el transporte rápido es posible abatir fácilmente la parte superior de la cabina con sólo pulsar un botón. En posición de transporte la recicladora sólo tiene 3 m de altura y, por lo general, no se requiere ningún permiso especial de transporte.



Figura A1.13, Transporte recicladora

El equipo de lavado de alta presión, accionado con bomba hidráulica, permite limpiar las piezas sucias de la máquina directamente in situ, lo que ahorra tiempo y deja la máquina bien preparada para la tarea siguiente.



Figura A1.14, Lavado recicladora

CONCLUSIONES

Del presente trabajo se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- El reciclado en frío in-situ es una opción innovadora y que posee bastantes ventajas ecológicas y económicas. Su principal arma de trabajo es la recicladora propiamente tal, la cual realiza el procedimiento de frezar a distintos espesores y mezclar con el ligante.
- Cualquier proyecto de reciclado utilizando asfaltos espumados requiere de un estudio profundo de la ruta, teniendo en cuenta la situación actual del pavimento y lo que se espera obtener de la ruta.
- El asfalto espumado se ha transformado al pasar los años en una excelente alternativa de conservación de caminos ya sea como estabilizador o realizando un reciclado de pavimento asfáltico existente, disminuyendo fuertemente el consumo energético y el costo final del proyecto.
- Los dos criterios más importantes para la determinación del asfalto espumado corresponde a la razón de expansión y vida media, por ende se debe estudiar de buena forma los porcentajes de agua y temperaturas del asfalto a utilizar en la mezcla.
- Dentro de las ventajas mas importantes que se pueden extraer al utilizar un reciclado en frío con asfalto espumado se encuentra: reutilización del material existente en ruta, impidiendo la explotación de

nuevos áridos, lograr una alta calidad de las capas estructurales recicladas, menores tiempos de construcción los cuales además también disminuyen los costos y generan un beneficio a los usuarios del camino, seguridad, pues el tren de reciclado se puede acomodar en el ancho de una pista, entre otras.

- A pesar de ser el asfalto espumado un agente estabilizador con varios años en el mercado, al comenzar esta memoria me he percatado que aun no es un tema que se conozca masificadamente entre las personas involucradas en el ámbito de la construcción local, ya que muchas no conocen ni han oído hablar de esta tecnología de reciclado in-situ con el uso de asfalto espumado.

- Para finalizar espero que este trabajo sea un aporte bibliográfico para nuestra Universidad, pues lamentablemente no existe material sobre este tema y así esta memoria ser la base para un posterior diseño práctico de la rehabilitación de una ruta mediante el uso de asfalto espumado, reciclando el pavimento asfáltico existente.

BIBLIOGRAFIA

WIRTGEN. **“Asfalto espumado el ligante innovador para la construcción de carreteras”**, (Wirtgen GMBH.Alemania, Noviembre 2001).

MANUAL DE CARRETERAS VOLUMEN 5, **“Especificaciones técnicas generales de construcción”**, (Dirección de Vialidad. Diciembre 2003).

MANUAL DE CARRETERAS VOLUMEN 7, **“Especificaciones y métodos de muestreo, ensaye y control”**, (Dirección de Vialidad. Diciembre 2003).

THENOUX, G. y JAMET, A. **“Tecnología del asfalto espumado”**, (Revista BIP, Junio 2002).

WIRTGEN, **“Manual de reciclado en frío”**, Segunda Edición (Wirtgen GMBH. Alemania, Noviembre 2004).

INSTITUTO CHILENO DEL ASFALTO, **“Asfalto espumado, tecnología y aplicaciones”**, (Boletín N°5, Agosto 2002).

REVISTA PERFORMANCE (Edición I, 2008), **“Mezclas asfálticas de temperatura reducida”**.

THENOUX, G. y JAMET, A. **“Tecnología del asfalto espumado y diseño de mezclas”**.

WIRTGEN. “**Recicladora WR 2500 S**”, Primera Edición (Wirtgen GMBH. Alemania, Noviembre 2006).

CONSTRUCTORA SAN FELIPE, “**Reposición ruta R-86, aplicando asfalto espumado**”, (Abril 2009).

9º CONGRESO INTERNACIONAL PROVIAL, “**Charlas sobre asfalto espumado**”, (MOP y Universidad Austral, Noviembre 2008).

DELLAROSSA ENZO, “**Charla técnicas de un proyecto de asfalto espumado**”, (Dirección de Vialidad, 2009).

WIRTGEN. “**información de obras realizadas**”, Primera Edición (Wirtgen GMBH. Alemania, Noviembre 2001).